

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

Uraniumverrijking in Nederland

Collectie Stichting *Laka*

www.laka.org
Gedigitaliseerd 2021

Uraniumverrijking in Nederland

Ir. F. E. T. Kelling, A. H. Lindhout,
ir. B.H. van de Wijngaert, mr. M. van der Stoel

Publikaties uit
Atoomenergie en haar toepassingen
november, december 1972
februari, maart 1973

INHOUD

Voorwoord	5
Prof. dr. J. A. Goedkoop	
Methoden van uraniumverrijking	7
Ir. F. E. T. Kelling (Reactor Centrum Nederland)	
Geschiedenis van de ultracentrifuge-ontwikkeling	23
in Nederland	
A. H. Lindhout (Reactor Centrum Nederland)	
De Nederlandse proeffabriek voor het verrijken van	31
natuurlijk uranium met behulp van ultracentrifuges	
Ir. B. H. van de Wijngaert (Ultra-Centrifuge Nederland NV)	
Het ultracentrifugeproject en de spreiding van kernwapens	41
Mr. M. van der Stoel (toenmalig lid van de Tweede Kamer der Staten Generaal)	

VOORWOORD

Deze publikatie is de bundeling van vier artikelen die tussen november 1972 en maart 1973 zijn verschenen in ATOOMENERGIE, voor de redactionele inhoud waarvan het Reactor Centrum Nederland verantwoordelijk is.

In het eerste artikel behandelt ir. F. E. T. Kelling van het RCN-laboratorium in Amsterdam een aantal grondbegrippen van de isotopenscheiding en vervolgens de belangrijkste drie methoden, met het accent op de gascentrifuge. Vervolgens geeft A. H. Lindhout (eveneens van het RCN) een historisch overzicht van het Nederlandse ultracentrifugeproject.

Van de vele informatiebronnen die hij hiervoor heeft geraadpleegd moet speciaal worden genoemd een documentatie over de beginjaren van het project, die is opgesteld door dr. C. le Pair van de Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie.

In het derde artikel wordt de isotopenscheidingsinstallatie in Almelo beschreven door ir. B. H. van de Wijngaert. Tenslotte vond de redactie mr. M. van der Stoel, lid van de Tweede Kamer, bereid de Nederlandse activiteiten te bezien tegen de achtergrond van het verdrag inzake niet-verspreiding van kernwapens.

J. A. Goedkoop.
Wetenschappelijk Directeur
Reactor Centrum Nederland

Methoden voor uraniumverrijking

The principles and different methods of isotope enrichment are reviewed, with emphasis on the gascentrifuge. Included is a comparison of three methods competing each other.

Toen gedurende de tweede wereldoorlog gezocht werd naar een praktische oplossing voor het verrijken van uranium in het 235 isotoop, zijn in het kader van het groots opgezette 'Manhattan-project' een groot aantal scheidingsprincipes onderzocht. Vele waren reeds jaren bekend. Zo werd reeds in 1919 door Aston en Lindemann gewezen op de mogelijkheid isotopen te scheiden in een centrifugaal veld, op de gasdiffusiemethode, de elektromagnetische separatie en de isotopenscheiding door destillatie. Later zijn nog andere procédés toegevoegd aan het scala van mogelijkheden, zoals ionenwisseling en scheiding gebaseerd op verschillen in chemische binding van isotopen met andere elementen. Van meer recente datum is de isotopenscheiding in een roterend plasma en die met behulp van Lasers. Uit de in de veertiger jaren bekende scheidingsmethodieken is in de USA, gedwongen door de tijdsomstandigheden, gekozen voor de gasdiffusiemethode. Dit heeft geresulteerd in de constructie van drie grote scheidingsfabrieken die successievelijk tussen 1945 en 1956 in bedrijf kwamen. De totale investering in deze fabrieken wordt door de Amerikanen opgegeven als \$ 2,3.10⁹, op volle capaciteit gebruiken zij een gezamenlijk vermogen van 6100 MW_e dat, omgezet in warmte door de compressoren, wordt afgevoerd door een waterkoelsysteem met een gezamenlijke capaciteit van 5.10⁶ m³ water per dag.

De keuze van de gasdiffusiemethode berust op het feit dat hiervan destijds het meeste bekend was, bovendien was reeds zeer veel voorbereidend werk door de Britten uitgevoerd. Enkele andere methoden, zoals thermosdiffusie en elektromagnetische scheiding, zijn daadwerkelijk op kleine schaal toegepast voor de eerste produktie van verrijkt uranium, terwijl ook een centrifugeproeffabriekje is gebouwd dat echter nooit heeft geproduceerd. Aan al deze methoden moest of nog veel substantieel onderzoek worden gedaan, of zij waren nog veel kostbaarder dan de gekozen diffusiemethode.

Overziet men de situatie van dit ogenblik, dan ziet men dat twee concurrenten elkaar bestrijden: Enerzijds de gasdiffusiemethode met een zeer hoge kostenpost voor de benodigde energie (40-50% van de

scheidingskosten), met noodzakelijkerwijze zeer grote fabrieken om economisch te kunnen werken, maar met een hoge mate van industriële 'know how' en jarenlange produktie-ervaring. Hier tegenover staat de ultracentrifuge met een relatief laag energieverbruik. Installaties uitgerust met centrifuges kunnen kleiner worden opgezet en kunnen veel gemakkelijker worden uitgebreid. In feite echter moet de uranumscheiding met centrifuges nog op industriële schaal worden gedemonstreerd. Hiertoe dient dan o.a. de proeffabriek in Almelo.

Op de achtergrond staat het Beckerse Jet-procédé met kapitaalkosten ongeveer gelijk aan die voor de gasdiffusiemethode, doch bovendien met een energetisch onrendabel proces. Het energieverbruik is ongeveer 2,5 keer hoger dan bij de gasdiffusiemethode.

De bouw van gasdiffusie-scheidingsinstallaties is niet beperkt gebleven tot de USA; zowel Groot-Brittannië als Frankrijk, de USSR en China bezitten dergelijke fabrieken.

Het scheidend vermogen

Om een scheidingsproces te kunnen definiëren is de grootheid 'scheidend vermogen' geïntroduceerd. Het is een maat die gebruikt wordt om het nut van een scheidingsmethode te kunnen beschrijven. Het gebruik van de grootheid opent de mogelijkheid de verschillende procédés met elkaar te vergelijken. Het begrip is in de isotopenscheiding dermate fundamenteel, dat een korte verklaring binnen het raam van dit artikel op zijn plaats is.

In een scheidingselement, maar ook in een cascade, wordt een inkomende materiaalstroom F met concentratie N_F gescheiden in een verrijkte stroom P met concentratie N_P en een verarmde stroom W met concentratie N_W . Noemt men de concentratieverhouding van het gewenste isotoop in de verrijkte

stroom en de voedingsstroom $\alpha_P = \frac{N_P}{N_F}$ de scheidingsfactor, dan is door deze grootheid de scheidende werking van het apparaat gedefinieerd. Hiermede is echter over het nut van het element nog niets vastgesteld. Aan een scheidingsproces met een zeer hoge scheidingsfactor doch met een debiet nul,

zal men evenmin iets hebben als aan een proces met een zeer groot debiet doch geen scheiding. Het nut wordt bepaald door de twee factoren, het debiet en de scheidingsfactor α (of de relatieve concentratieverschuiving $\varepsilon = \alpha_P - 1 = \frac{N_P - N_F}{N_F}$).

$$\varepsilon = \alpha_P - 1 = \frac{N_P - N_F}{N_F}.$$

Men kent nu in navolging van Dirac aan de concentratie een potentiaal- of waardefunctie V_N toe. Hiermee wordt uitgedrukt welke waarde een massaeenheid materiaal van een concentratie N bezit ten opzichte van een concentratie met waardefunctie of potentiaal nul.

De totale opgeslagen arbeid die in een hoeveelheid F kg uranium met concentratie N_F en waardefunctie of potentieel V_F is opgeslagen t.o.v. een nulwaarde-niveau, wordt op dezelfde wijze berekend als de arbeid die is verricht om een massa m op hoogte h te brengen. De opgeslagen scheidingsarbeid is FV_F . Nu wordt ieder eenvoudig scheidingsproces gekarakteriseerd door minstens drie materiaalstromen, de voeding F met concentratie N_F (V_F), de verrijkte fractie P met concentratie N_P (V_P) en de verarmde fractie W met concentratie N_W (V_W).

De scheidingsarbeid wordt aangegeven door:

$$\Delta u = PV_P + WV_W - FN_F. \quad [1]$$

Worden de materiaalstromen uitgedrukt in kg u/sec dan verkrijgt men het scheidend vermogen in kg u/sec.

De waardefunctie zelf wordt gegeven door

$$V = (2N - 1) \ln \frac{N}{1 - N} \quad [2]$$

Nu is het mogelijk, gebruik makend van de materiaalbalansen, het scheidend vermogen te schrijven als functie van de scheidende werking. Voor een symmetrisch proces, waarmee bedoeld wordt dat de scheidingsfactor voor het verrijkende deel α_P gelijk

is aan die voor het verarmende deel $\alpha_W = \frac{N_F}{N_W}$, valt nu te berekenen dat voor zeer kleine scheiding ($\varepsilon \ll 1$) het scheidend vermogen te schrijven is

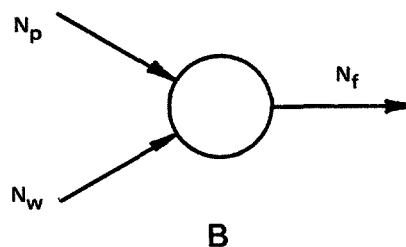
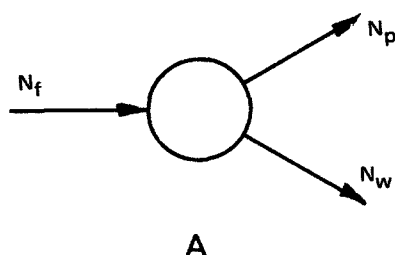
$$\Delta U = \frac{1}{2} F \varepsilon^2 \quad [3]$$

In het gedeelte handelend over de scheidingsmethoden, zal worden bewezen dat de scheidingsfactor voor de meeste scheidingsprocessen niet afhankelijk is van het concentratieniveau, derhalve is ook het scheidend vermogen niet afhankelijk van het concentratieniveau waarop het element werkt.

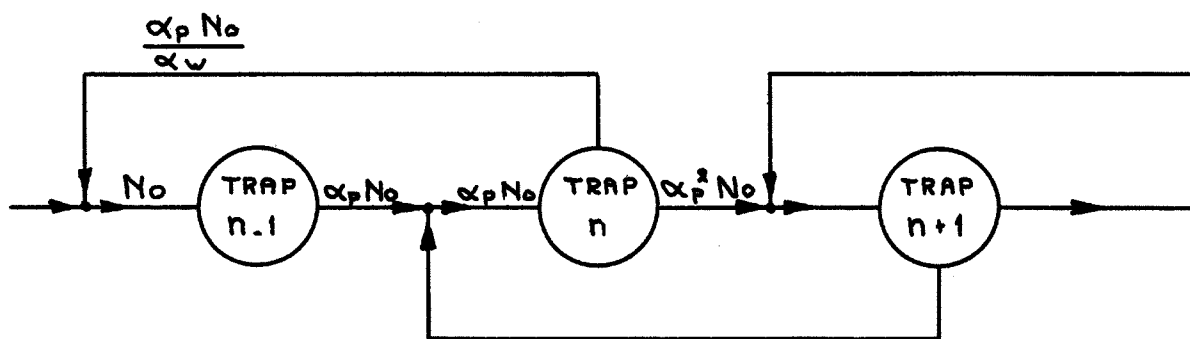
Cascadering

Een hedendaagse factor vraagt voor haar economisch bedrijf een voedingsmateriaal met een concentratie tussen 2,5% en 3,5% ^{235}U . De natuurlijke ^{235}U -concentratie is echter ca. 0,7%. Dit betekent dat het natuurlijke materiaal met een factor 3,5-5 moet worden verhoogd om gebruikt te kunnen worden. Tot op heden is het, buiten de elektromagnetische separatie, nog niet gelukt een proces te ontwikkelen dat een dergelijke grote scheidingsfactor bezit. Zo heeft de gasdiffusiemethode een scheidingsfactor $\alpha = 1,002$. Om nu toch een zo grote scheidingsfactor te verkrijgen zoekt men zijn toevlucht tot het in serie schakelen van de scheidings-elementen. Dit geschiedt op een zodanige wijze dat ieder element gevoed wordt met een concentratie afkomstig van de verrijkte stroom van zijn voorganger. Evenmin is het gelukt een apparaat te ontwikkelen met zeer grote materiaalstromen. Dit wordt ondervangen door grote aantallen scheidings-elementen parallel te plaatsen.

Nu genereert ieder binair scheidingsproces twee soorten produktstromen, één waarvan de gewenste component is verrijkt ten opzichte van het voedingsmateriaal en één waarin deze component is verarmd. Het zou denkbaar zijn de verarmde stroom uit het proces te verwijderen. In het algemeen wordt dit echter nooit gedaan. De waarde en dus ook de prijs van het materiaal zullen steeds hoger worden naarmate de concentratie toeneemt. Ook is de prijs



Figuur 1. A. Scheidingselement positief scheidend vermogen; B. Mengpunt negatief scheidend vermogen.



Figuur 2.

van het voedingsmateriaal van belang; 1 kg UF_6 met de natuurlijke uranijsamenstelling kost ca. f 50,-, terwijl tot 3% verrijkt materiaal U reeds ca. f 800,- per kg U kost.

Om deze reden worden de verarmde stromen weer in het scheidingsproces teruggevoerd. Dit schept echter een voorwaarde waaraan het element moet voldoen. Wordt aan een scheiding een positief scheidend vermogen toegekend, dan zal namelijk bij iedere menging van ongelijke concentraties scheidend vermogen worden vernietigd (fig. 1).

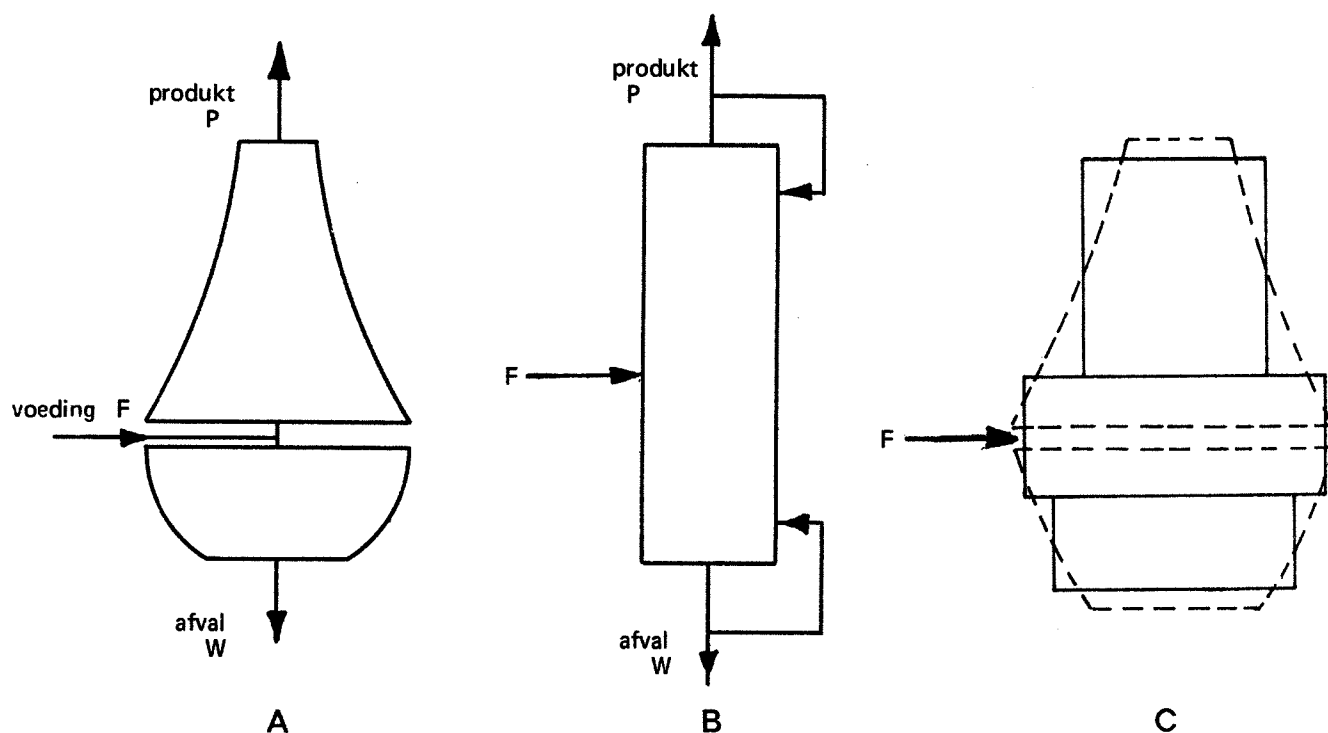
Dit houdt in dat voor een optimaal werkende cascade, wil men geen scheidend vermogen vernietigen, de concentratie van twee samenkomende stromen gelijk moet zijn. Verkiest men de verarmde concentratie een trap lager in de cascade als voeding te gebruiken, dan blijkt dat het scheidingselement, wat

zijn scheidingsfactor betreft, symmetrisch moet worden bedreven.

$\left(\alpha_p = \frac{N_P}{N_F} = \alpha_w = \frac{N_F}{N_W} \right)$ terwijl tevens het element onder deze conditie het hoogste scheidend vermogen moet leveren (fig. 2).

Trap n-1 wordt gevoed met een concentratie N_0 , haar elementen bezitten een verrijkingsfactor α_p en een verarmingsfactor α_w . Alle elementen in iedere trap zijn identiek. Trap n-1 produceert dan een verrijkte concentratie van $\alpha_p N_0$ welke, indien geen menging aanwezig is, gelijk is aan de voedingsconcentratie voor trap n. De verarmde stroom uit trap

Figuur 3. A. Ideale cascade vorm; B. Rechtgetrokken cascade; C. Cascade bestaande uit drie rechtgetrokken delen.



n bezit derhalve een concentratie $\frac{\alpha_p N_0}{\alpha_w}$ welke alleen aan de voedingsconcentratie gelijk is indien $\alpha_p = \alpha_w$: de elementen moeten symmetrisch werken.

Op deze wijze worden de gasdiffusiecellen in een cascade geschakeld en kunnen ook de centrifuges worden gebruikt in een cascade. Indien echter zou blijken, dat de centrifuge een hoger scheidend vermogen bezit indien deze niet symmetrisch zou worden bedreven, dan kan - zij het met enige mengverliezen - de verrijkte stroom (bijv.) twee trappen hoger in de cascade als voeding worden gebruikt. Een cascade voorzien van symmetrisch werkende elementen, alle functionerend onder gelijke condities, wordt een ideale cascade genoemd. In fig. 2 is weergegeven dat een trapvoeding ontstaat door samenvoeging van twee processtromen. In de top- en bodemtrap van de cascade is dit niet mogelijk. Door het ontbreken van een scheidingstrap boven de toptrap bestaat hier de voeding alleen uit de verrijkte stroom van de trap er onder.

Tengevolge van deze discontinuïteiten krijgt nu de ideale cascade de bekende, in fig. 3 weergegeven tapse vorm.

De verticale uitgebreidheid van de cascade wordt bepaald door de scheidingsfactor van het gebruikte element en de gewenste eindconcentratie. Beide factoren samen geven het aantal trappen. De breedte van de cascade wordt gegeven door de gewenste productie in kg/sec. Omdat aan alle scheidings-elementen in een cascade vrijwel gelijke voedingshoeveelheden moeten worden toegediend, zal de breedte ook het aantal parallel geplaatste elementen bepalen. In een ideale cascade zal daarom iedere trap verschillende aantallen elementen bevatten. Nu bestaat een gasdiffusiecascade uit een duizendtal trappen om een concentratie van $\sim 3\%$ ^{235}U te produceren. De ideale cascade vorm met zijn sterk verlopende massastroom per trap is hiervoor minder geschikt. Bekend is, dat de energiepost voor de gascompressie een beduidend gedeelte van de scheidingskosten uitmaakt. Voor een optimaal compressorrendement zou dit voor iedere trap een gewijzigd compressorontwerp betekenen. Om toch gebruik te kunnen maken van een zelfde compressorontwerp welke optimaal kan worden bedreven, wordt de ideale cascadevorm zo goed mogelijk benaderd door enkele rechtgetrokken cascadedelen in serie te plaatsen. Mengverliezen zullen dan optreden welke het scheidend vermogen sterk verlagen en de totale circulatiestroom tussen de trappen doen toenemen. Het verlies aan scheidend vermogen wordt gecompenseerd door het plaatsen van meer scheidingseenheden.

Reeds is opgemerkt dat het cascade-voedingsmateriaal duur is. Wordt nu de veraarmde stroom, afkomstig uit de verrijkingstrappen zonder meer uit het proces verwijderd, dan zal men tevens het grootste gedeelte van het ingevoerde ^{235}U weggooien. Onder het verrijkende of rectificerende deel van de cascade zal men daarom altijd een strippend of verarmend deel vinden. Dit heeft als enige taak het inkomend voedingsmateriaal optimaal te benutten wat het ^{235}U betreft. Het incorporeren van een stripper betekent een kleinere hoeveelheid cascadevoeding. In de regel installeert men in de stripper zoveel scheidend vermogen, dat de daarmee evenredige scheidingskosten even groot zijn als de besparing aan voedingsmateriaal. Met andere woorden, de stripper produceert zelf voedingsmateriaal, tegen een prijs gelijk aan die van het voedingsmateriaal zelf. De prijs van het geproduceerde materiaal wordt nu berekend met

$$PC_p = FC_F + C_{\Delta} \Delta U \quad [4]$$

C_p en C_F zijn hierin de kg prijzen van het produkt resp. de voeding, terwijl C_{Δ} de zgn. scheidingskosten per eenheid scheidend vermogen voorstelt. In de factor C_{Δ} zijn alle voor het bedrijf van de cascade gemaakte kosten ingebracht.

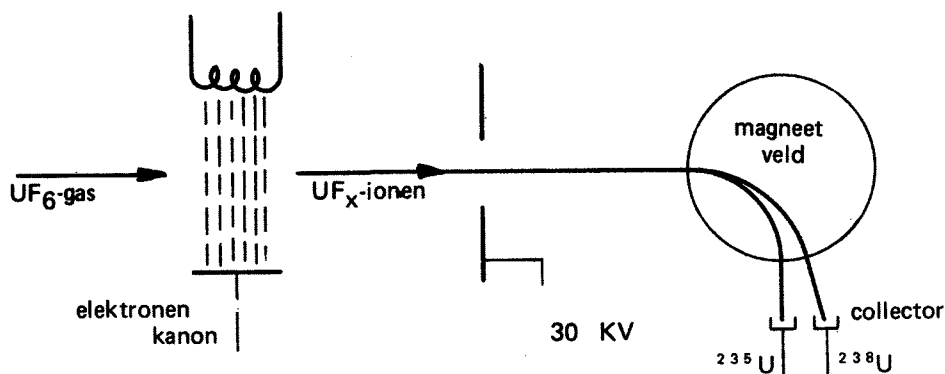
Bij de zgn. 'toll enrichment' procedure, wordt alleen de post $C_{\Delta} \cdot \Delta U$ in rekening gebracht, met een vastgestelde cascade waste concentratie. Het voedingsmateriaal zal men of zelf moeten leveren of van de verrijkingsinstantie moeten betrekken. Uit de cascade-massabalans kan men berekenen dat

$$\frac{P}{F} = \frac{N_F - N_W}{N_P - N_W}.$$

Met behulp van deze betrekking en die voor het scheidend vermogen is dan ΔU te berekenen en daarmee de prijs van het produkt per gewichtseenheid.

Scheidingsmethoden

Het is in dit bestek ondoenlijk alle voor de ^{235}U -scheiding mogelijke methoden te behandelen. Het onderstaande heeft daarom alleen betrekking op die methoden welke thans in het middelpunt van de belangstelling staan, of historisch van belang zijn geweest. Allereerst nog een opmerking over het gebruikte procesmateriaal. Alle thans in gebruik zijnde methoden maken gebruik van het UF_6 in de gasvormige toestand. Alleen tengevolge van het feit dat fluor slechts één isotopische massa bezit, is deze stof te gebruiken. Zou het fluor twee isotopen bezitten, dan zou een scheiding van het ^{235}U van het ^{238}U praktisch een onmogelijke zaak worden. Het UF_6 is een sublimeerbare verbinding met een dampdruk van ca. 80 mm Hg bij kamertemperatuur. Het is een hoogst agressieve verbinding welke



Figuur 4.

met water en koolwaterstoffen direct reageert en daarbij vaste uraniumverbindingen produceert. Het UF_6 kan daarom alleen in van lucht afgesloten, geëvacueerde ruimten worden gehanteerd.

a) De elektromagnetische scheiding

Deze methode berust op het versnellen van uraniumionen in een elektrisch veld tot energieën van 30-50 keV, waarna de bundel in een magnetisch veld wordt gestuurd. Hier beschrijft ieder deeltje een cirkelvormige baan met een kromtestraal welke wordt voorgeschreven door de verhouding tussen lading en massa (fig. 4).

Deze methode is daarom interessant, omdat het de enige wijze is om in één stap zeer hoog verrijkt uranium te produceren. Het grote nadeel is echter de zeer geringe produktie van slechts een tiental mg per dag. In ieder geval waren grotere aantallen van deze instrumenten, de calutrons, de eerste produktiemiddelen van verrijkt uranium in de USA. Deze methode wordt thans nog steeds gebruikt voor analysedoeleinden, zoals het bepalen van isotopenverhoudingen.

b) De thermodiffusie

In principe berust ieder diffusieverschijnsel op de eigen warmtebeweging van de deeltjes. De gemiddelde snelheid van een molecuul is $\bar{C} \propto \sqrt{\frac{T}{m}}$ en

men ziet dat deze verandert met de massa m van het deeltje en met de instelbare temperatuur. De thermodiffusie maakt zowel van het massaverschil als van het temperatuurverschil gebruik. Onder invloed van een temperatuurgradiënt heeft één isotoop een geringe neiging zich te verzamelen aan de lage temperatuur-zijde, terwijl het andere isotoop zich eerder naar de hoge temperatuur-zijde wil begeven. Een thermodiffusiekolom bestaat uit twee co-axiale cilinders, waarvan de binnenste wordt verhit en de buitenste gekoeld (fig. 5).

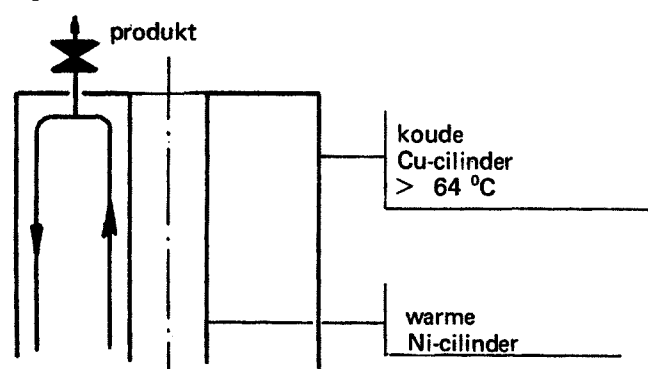
In de ringvormige spleet is een radiale temperatuurgradiënt aanwezig en daardoor treedt een radiale ontmenging van de isotopen op. Tengevolge van convectieve effecten ontstaat een axiale tegenstroomwervel waarvan men gebruik maakt om de radiale scheiding in een axiale om te zetten (zie centrifuge).

In een vrij laat stadium werd deze methode, naast de elektromagnetische scheiding daadwerkelijk toegepast voor de eerste produktie van hoog verrijkt ^{235}U . De installatie bestond uit enige duizenden 15 meter lange concentrische buizen van koper (koud) en nikkel (heet), terwijl het procesmateriaal bestond uit vloeibaar UF_6 onder hoge druk. Een scheidingsfactor van 1,3 was te bereiken, hetgeen een 30% ontmenging t.o.v. het voedingsmateriaal betekent. Daar een diffusieproces op zichzelf al traag is, zeker in de vloeistoffase, terwijl de vullingen van dergelijke apparaten zeer groot zijn (200-300 kg UF_6), liggen de insteltijden in de orde van enkele dagen per element.

c) De gasdiffusiemethode

De isotopenscheiding door gasdiffusie berust op

Figuur 5. Thermodiffusiekolom.



het diffunderen van gasmoleculen door een poreuze wand. Het eigenlijke scheidingsproces speelt zich af in het zogenaamde 'Knudsen'-gebied. Dit is een gebied waarin de vrije weglengte van de moleculen groter is dan de geometrische afmeting van de porie. Anders gezegd, het molecuul heeft een kleinere kans op een botsing met een soortgenoot dan met de wand. De passage van een deeltje wordt daarom niet gehinderd door onderlinge botsingen, doch alleen door botsingen met de wand. De diffusiesnelheid in een Knudsen-gas is dan theoretisch bepaald door de thermische deeltjessnelheid

$$\bar{C} \sim \sqrt{\frac{T}{m}}.$$

Het aantal diffunderende deeltjes wordt echter tevens bepaald door de molecule-concentratie en de druk. Men kan dan voor de deeltjes flux van de ene isotoop schrijven

$$\phi_1 = N_0 p_0 a \sqrt{\frac{T}{M_1}} \text{ mol/sec.}$$

Voor het tweede isotoop is iets dergelijks te schrijven

$$\phi_2 = (1 - N_0) p_0 a \sqrt{\frac{T}{M_2}} \text{ mol/sec.}$$

waarin de index $_0$ de begin- of voedingscondities voorschrijft is.

(De grootte a is een constante waarin het poreuze oppervlak of de permeabiliteit is opgenomen, terwijl p_0 de druk voorstelt.)

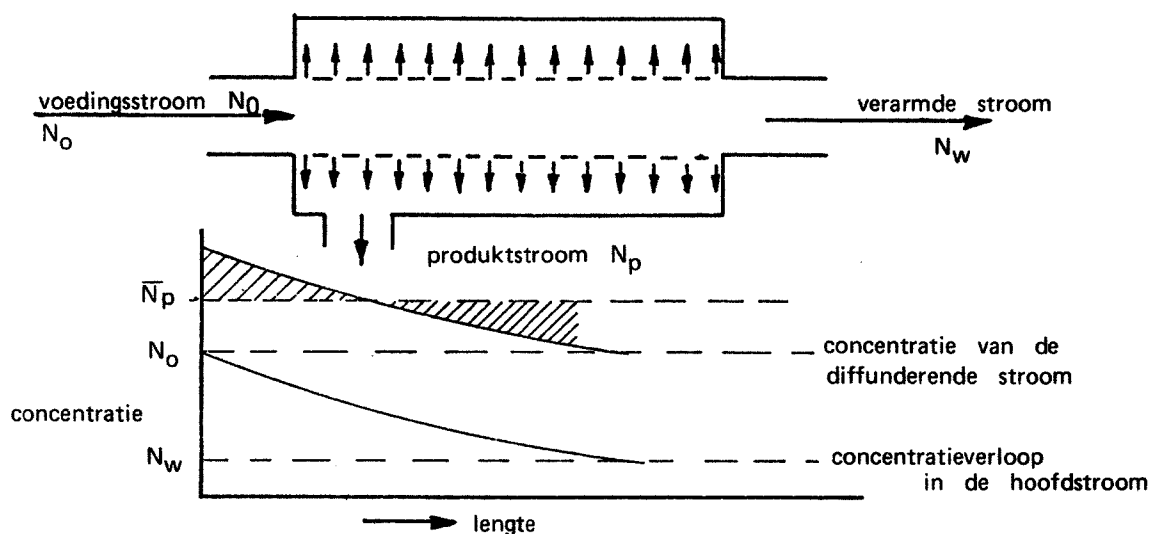
Aangezien de verhouding van de molecuultransporten tevens de concentratieverhouding van het gediffundeerde gas bepaalt, vindt men door deling van beide grootheden de theoretisch maximaal mogelijke ontmenging.

$$\frac{N_p}{1 - N_p} = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{N_0}{1 - N_0} \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$$

De factor $\sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta M}{M}}$ noemt men de elementaire scheidingsfactor van het proces. Zij bedraagt voor de $^{235}\text{UF}_6$ - $^{238}\text{UF}_6$ -scheiding $\alpha = 1,00429$.

Er zijn nu een aantal factoren welke de maximaal mogelijke ontmenging verlagen. Allereerst is in de afleiding van de elementaire scheidingsfactor α aangenomen dat de lage druk zijde geen enkele invloed uitoefent op de scheiding, in feite is zelfs deze druk op nul gesteld. Dit is uiteraard onjuist. Tengevolge van de noodzakelijke cascadering van het proces zal het gediffundeerde gas weer moeten worden gebruikt als voedingsmateriaal van de volgende trap. Daarom zal dit gas met behulp van een compressor weer op de oude druk moeten worden gebracht.

Een lage aanzuigdruk van de compressor betekent echter een groot pompvolume en daardoor grote compressoren. Door een hogere druk van het gediffundeerde gas wordt het verschijnsel van terugdiffusie van belang. Omdat het scheidingsprincipe zich baseert op de eigenschappen van een Knudsen-gas, kan het gas immers ook ongehinderd terugdiffunderen. Om het aanzuigvolume van de pomp zo klein mogelijk te houden, zal daarom een zo hoog mogelijke aanzuigdruk worden gekozen bij een zo groot mogelijke drukverhouding over het membraam. De grens wordt nu gesteld door de membraaneigenschappen. Door het opvoeren van de druk zal een punt worden bereikt waarin de gastoestand in de porie niet meer beantwoordt aan de Knudsen-toestand.



Figuur 6.

Nog een derde verlaging van de scheidingsfactor is aanwezig. Het in de scheidingscel stromende gas zal, stromend langs het membraam, langzamerhand aan het ^{235}U -isotoop worden verarmd. Dit isotoop diffundeert immers in een richting loodrecht op de stroming door het membraam. Op deze wijze wordt in de hoofdstroming een axiale concentratiegradiënt veroorzaakt. Dit heeft tot gevolg dat het diffusieproces zich bij een steeds lagere concentratie afspeelt gedurende zijn passage door de cel (fig. 6). De gemiddelde produktconcentratie is dan eveneens lager dan zou worden verwacht indien de concentratie over de gehele cellengte constant zou zijn en gelijk aan de voedingsconcentratie N_0 . Het scheidingselement levert een kleinere concentratieverhouding af tussen produkt en voedingsstroom en dit komt tot uiting in een kleinere scheidingsfactor.

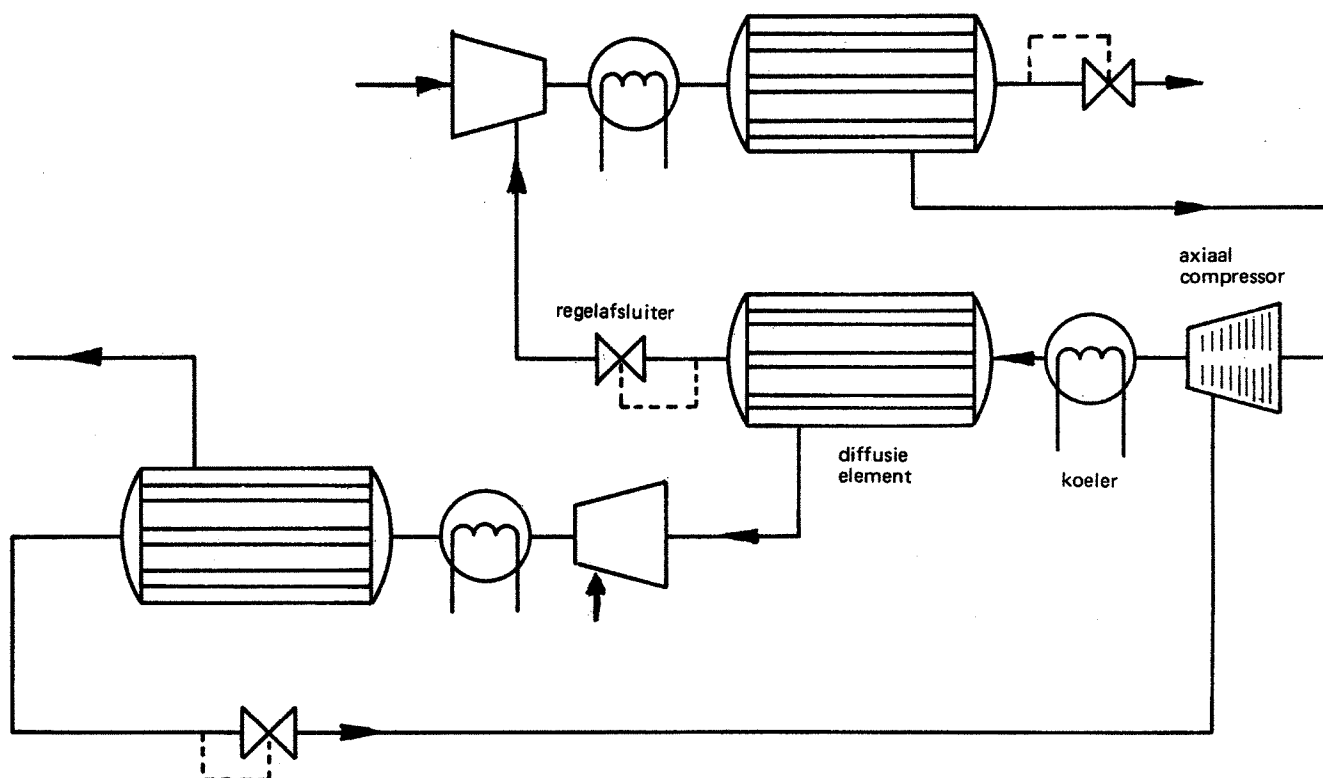
Uit het bovenstaande blijkt dat de scheidende werking van een diffusie-apparaat sterk afhankelijk is van de drukverhouding over het membraam, het drukniveau waarop het proces zich afspeelt, de poriëngrootte in het membraam en de permeabiliteit van de scheidingswand. Alle genoemde factoren spelen echter ook een grote rol in de kapitaalinvestering en de bedrijfskosten.

Het vaststellen van de separatie-coëfficiënt ε kan daarom pas geschieden met een gecompliceerd optimalisatieproces, waarin de kapitaalinvestering

voor het membraanoppervlak, de compressoren en het aantal noodzakelijke cascadetrappen moeten worden afgewogen tegen de energiekosten welke een functie zijn van de compressieverhouding en eveneens het aantal trappen in de cascade. Het geheel wordt nog verzwaaard door de eigenschappen van het UF_6 . Zoals reeds is opgemerkt, worden bij ontleding van het UF_6 vaste uraniumverbindingen gevormd welke het scheidingsmembraam kunnen verstopen.

Bij een procesdruk van ca. 500mmHg is de vrije weglengte van het UF_6 100-200Å. De poriën zullen daarom een diameter van deze grootte moeten bezitten. Tengevolge van de optredende verstopping zal in feite een groter membraanoppervlak moeten worden geïnstalleerd. Tevens zal, om te komen tot een zeer beperkt aantal typen compressoren, het effect van een rechtgetrokken cascade of cascade-delen in de beschouwing moeten worden betrokken. Uit het weinige dat uit de literatuur bekend is, kan een redelijke schatting worden gemaakt van de praktische scheidingsfactor. Uit een optimalisatie van de energiebehoefte per eenheid scheidend vermogen blijkt, dat de optimale compressieverhouding ca. 3,6 is. Hiermede valt een scheidingsfactor

Figuur 7. Schematische voorstelling van de schakeling van enkele trappen in een diffusiecascade.



van $\alpha = 1,0018$ te bereiken. Dit getal zal niet ver bezijden de waarheid zijn. Dit betekent echter, dat telkens wanneer UF_6 na een membraam te zijn gepasseerd, waarbij de concentratie van het ^{235}U -isotoop 1,0018 keer is verhoogd, het gediffuseerde gas minimaal 3,6 maal in druk moet worden verhoogd. De compressieverhouding zal echter tengevolge van drukverliezen in de diffusiecel en de toevoerleidingen wel hoger zijn. Een praktische compressieverhouding van ongeveer 4 zal voor het energieverbruik daarom reëler zijn.

Een indruk van wat dit betekent is te verkrijgen door toepassing van formule 3. Om een scheidend vermogen van 1 kgU/sec te bereiken, moet een voeding van ca. 900 ton UF_6 /sec als voeding worden toegediend aan alle diffusie elementen in de trappen van de cascade. Hiervan moet de helft, na het passeren van de scheidingswand, een factor 4 in druk worden verhoogd.

Het niet gediffundeerde gedeelte, dat een geringere drukdaling ondervindt door de stromingsweerstand, wordt in de hoge druk trappen van de axiaalcompressor toegevoerd (fig. 7).

Een ideale cascade met een produktconcentratie van 3,2% ^{235}U zal dan uit 1400 trappen bestaan. Een reductie van het aantal trappen tengevolge van het rechtekken van cascadedelen kan substantieel zijn. Mogelijk is dat hierdoor enkele honderden trappen minder kunnen worden geïnstalleerd.

d) De centrifugemethode

Wordt in een roterende cilinder een gas gebracht, dan zal dit gas in eerste instantie de hoeksnelheid ω van de cilinder bezitter. De optredende centrifugaalkracht zal dan het gas naar de wand van de cilinder verdichten. Dit resulteert in een radiale gasdichtheidsdistributie, welke gegeven wordt door

$$\rho_r = \rho_0 \exp \frac{M\omega^2 r^2}{2RT} \quad R \text{ is de gasconstante.}$$

Dat niet al het gas zich aan de wand bevindt, zoals dit wel het geval zal zijn indien men bijvoorbeeld glazen knikkertjes in de centrifuge zou brengen, wordt veroorzaakt door de drukdiffusie, welke deeltjes transporteert van hoge naar lage dichtheid. In een met gas gevulde centrifuge bestaat daarom een dynamisch evenwicht tussen de drukdiffusiestroom welke de dichtheidsgradiënt teniet wil doen en de deeltjesstroom tengevolge van de versnellingskrachten welke de gradiënt juist wil opbouwen. Het onderscheid tussen de centrifuge en het gasdiffusieproces is juist de conditie dat het centrifugeproces in feite een evenwichtsproces is, terwijl de gasdiffusie dit niet is. Dit komt tot uitdrukking in de hoge energiekosten van de laatste.

Ook in het centrifugeprocédé komen zeer hoge

radiale compressieverhoudingen voor (tabel I), geldend voor UF_6 en kamertemperatuur.

TABEL I

Omtreksnelheid m/sec.	Radiale compressie- verhouding p_r/p_{as}
300	590
400	$5,5 \cdot 10^4$
500	$2,6 \cdot 10^7$

In een mengsel van twee componenten geldt nu voor ieder component een dichtheidsopbouw als geschetst. Nu is de dichtheid van een gas recht evenredig met het aantal deeltjes per volume-eenheid. Deling van de beide dichtheden levert dan de maat voor de radiale concentratieverhouding in de centrifuge

$$\frac{N_{as}}{1-N_{as}} = \frac{N_r}{1-N_r} \exp \frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT}$$

De vermenigvuldigingsfactor

$$\exp \frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT} \sim 1 + \frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT}$$

noemt men ook hier de elementaire scheidingsfactor. Deze kwantificeert de radiale ontmenging (tabel II).

TABEL II

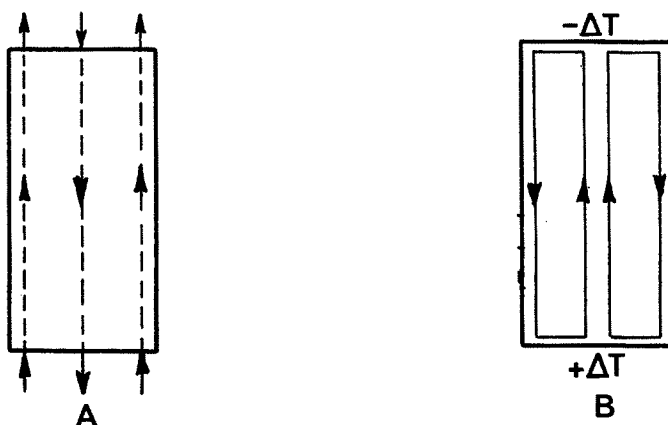
$v\varphi$ m/sec.	α	ε_0
300	1,052	0,052
400	1,093	0,093
500	1,145	0,145

We zien dat de elementaire scheidingscoëfficiënt in de centrifuge onder deze condities reeds ca. 20 keer groter is dan de overeenkomstige coëfficiënt voor het gasdiffusieprocédé en tevens dat deze niet afhankelijk is van het relatieve massaverschil. Het absolute massaverschil is bepalend. Dit wijst er reeds op, dat de centrifuge eerder geschikt is voor de scheiding van zware massa's dan de gasdiffusiemethode.

Om nu de radiale ontmenging om te zetten in een axiale, maakt men evenals in de thermodiffusie gebruik van een axiaal massatransport. Het effect is hetzelfde als in een warmtewisselaar, waar een radiaal temperatuurverschil omgezet wordt in een axiaal temperatuurverschil.

Zoals uit fig. 8a blijkt, kan het axiale massatransport van buitenaf worden opgedrukt, door aan de ene zijde in de as gas toe te laten dat aan de andere zijde wordt afgetapt. Op zijn weg door de centrifuge verliest dit gas zijn zware component naar de cilinderwand. Aan de tegenovergestelde kant wordt een

Figuur 8. A. Van buitenaf ingestelde tegenstroom wervel; B. Intern opgewekte tegenstroom wervel.



tweede gasstroom op grote radius ingelaten. Dit gas zal zijn lichte component naar de as afstaan en de zware, uit de as afkomstige deeltjes, opnemen. In de praktijk wekt men echter een interne tegenstroomwervel op. Dit kan gebeuren door beide einddeksels een temperatuurverschil te geven t.o.v. het gas. Tengevolge van de grote radiale versnelling zal een loodrecht hierop staande temperatuurgradiënt grote convectiestromen opwekken.

Theoretisch neemt nu, tengevolge van de tegenstroomwervel, de axiale scheidingsfactor toe als functie voor de lengte. Voor de optimale conditie van het scheidend vermogen valt te berekenen dat

$$\alpha_{a\text{iaal}} \sim 1 + \frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT} \frac{L}{D} \frac{1}{\sqrt{2}}$$

waarin L de rotorlengte en $2r$ de rotor diameter is. Men ziet dat de scheidingscoëfficiënt $\Sigma = \alpha - 1$ evenredig is met de lengte-diameter verhouding. Het bij deze condities behorende scheidendvermogen wordt dan gegeven door

$$\Delta U = \rho D \left(\frac{\Delta M \omega^2 r^2}{2RT} \right) \frac{\pi L}{2}$$

waarin ρ de dichtheid en D de zelfdiffusie-coëfficiënt van het UF_6 -gas is. Deze betrekkingen zijn van fundamenteel belang voor het centrifuge-ontwerp. Men ziet dat het scheidend vermogen niet afhankelijk is van de radius, recht evenredig is met de lengte en vooral met de omtreksnelheid tot de vierde macht.

Nu zijn er vele factoren die het scheidend vermogen verlagen. Vat men een centrifuge op als een serie-schakeling van scheidingselementen, dan is de ideale centrifugevorm die van een ideale cascade welke in de praktijk echter moeilijk is door te voeren. Algemeen wordt de cilindrische vorm gekozen. De centrifuge is hierdoor vergelijkbaar geworden met een rechtgetrokken cascade en bezit hierdoor een lager scheidend vermogen. In feite is het scheidend vermogen slechts 80% van het maximaal

theoretisch haalbare. Temperatuurstoringen t.g.v. de hoge radiale versnellingen, remming van het gas in tangentiële richting tengevolge van stilstaande elementen in de as van de centrifuge of veroorzaakt door het radiaal naar buiten stromen van het gas aan een van de centrifuge-einden, verlagen het scheidend vermogen eveneens.

Bij het ontwerpen van een centrifuge zal men zich in de eerste plaats toeleggen op het bereiken van een zo hoog mogelijke omtreksnelheid. Deze wordt voorgeschreven door de specifieke sterkte van het gekozen materiaal.

$$\frac{\sigma}{\rho} = (\omega r)^2$$

In het algemeen moeten correcties worden toegepast tengevolge van extra spanningen welke door de specifieke constructie-elementen worden voorgeschreven. Eveneens is het mogelijk dat, voor de bepaling van de toelaatbare spanning, een reductie moet worden verdisconteerd om een bepaalde levensduur van de centrifuge te kunnen waarborgen. Een indruk van de maximaal toelaatbare omtreksnelheden voor verschillende materialen geeft tabel III. De getabelleerde scheidende vermogens zijn betrokken op een lengte-eenheid van de rotor.

Is door keuze van het materiaal de omtreksnelheid vastgesteld, dan zal men de lengte zo groot mogelijk kiezen. Hierbij stuit men echter op een fundamentele factor welke betrekking heeft op de ligging van de buigfrequenties van de centrifugecilinder. Deze vrije buigfrequenties worden bepaald door de trekking

$$\omega_{n\text{-krit}} = C_n \frac{r}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$\text{of } (\omega r)_{n\text{-krit}} = C_n \frac{(r)^2}{(L)^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E is de elasticiteitsmodulus.

TABEL III

Materiaal	$\pi \text{ kgf/mm}$	$\rho \text{ gr/cc}$	v_{maz}	v/v_{Al}	$\Delta U/\Delta U_{Al}$
Al-legering	45	2,8	400	1	1
Ti-legering	110	4,7	480	1,2	2,1
Maraging-staal	220	8	520	1,3	2,8
Be-legering	60	1,8	570	1,4	4,2
Koolstofvezel in Al of epoxy matrix	100	2	700	1,75	9,3

De index n heeft betrekking op de orde van de buigkritische, waarbij C betrekking heeft met de stijfheid waarmee de rotor met de omgeving is verbonden. Uit de betrekking volgt dat, wil men de eerste buigkritische van de cilinder niet passeren, de lengte-diameterverhouding kleiner moet zijn dan uit de bovenstaande betrekking volgt. Nu zullen altijd de oplegfrequenties van de centrifuge op haar ondersteuning moeten worden gepasseerd. Het zou daarom denkbaar zijn de eerste buigkritische frequentie zeer laag in toeren te leggen. De consequentie hiervan is echter dat een heel scala van deze kritische frequenties moet worden gepasseerd om de nominale omtreksnelheid te bereiken. Dit vereist gecompliceerde en kostbare constructies voor de demping en de lagering, omdat onder deze condities de krachten groot en de weg te dempen energien hoog zijn. Ook andere kunstgrepen zijn toe te passen zoals het plotseling veranderen van de oplegstijfheden, welke echter alle hun specifieke nadelen bezitten. Over het algemeen wordt daarom de lengte-diameter verhouding zo gekozen dat de centrifugecilinders beneden hun eerste buigkritische frequenties draaien. Heeft men tot deze stap besloten, dan zal nog de cilinderdiameter moeten worden gekozen. Dit is echter een keuze welke door een veelheid van economische parameters wordt bepaald. Wel zullen technische grenzen kunnen worden gesteld welke de diameter naar grotere waarden afbakenen. Zo zal de lagerbelasting in het algemeen toenemen met een vergroting van de diameter. De belangrijkste parameters blijven echter toch de economische. Met vergroting van de diameter zullen de materiaalkosten toenemen, en wel, afhankelijk van de centrifuge-component, evenredig met de diameter of kwadratisch met de diameter. Ook de fabricagekosten zullen stijgen met de diameter.

Aangezien met een vergroting van de diameter tevens de lengte van de centrifuge zal toenemen, stijgt het scheidend vermogen van de centrifuge. Dit betekent dat minder centrifuges behoeven te worden geïnstalleerd, hetgeen tot uitdrukking komt in montagekosten van de centrifuge in een fabriek voor de vervaardiging van centrifuges en in de installatiekosten in de procesfabriek.

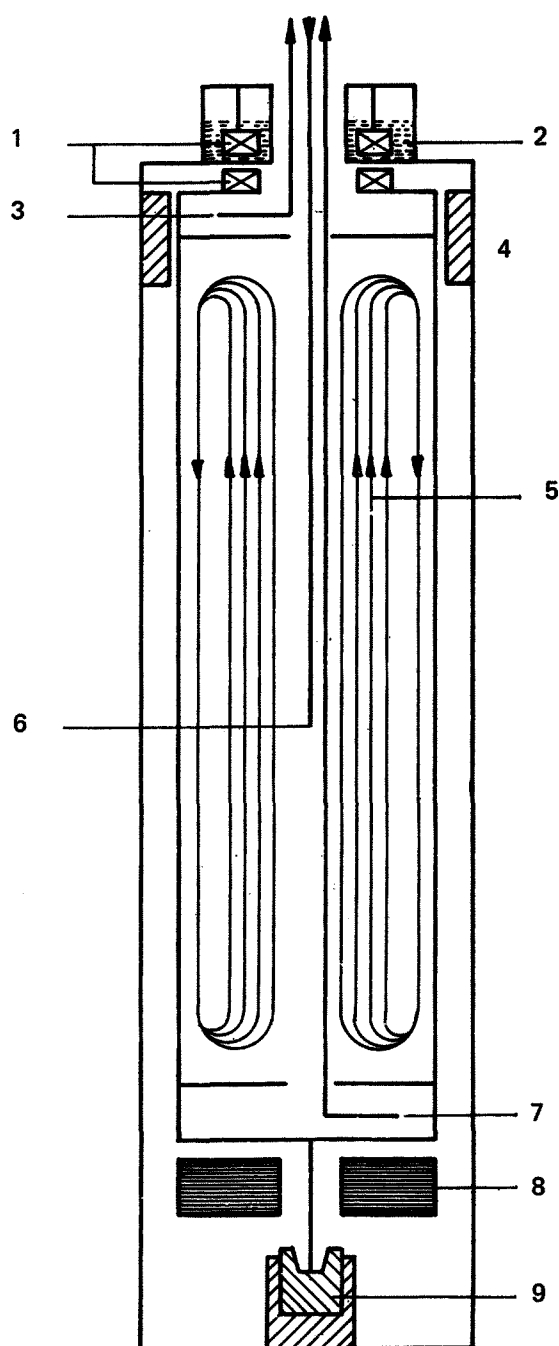
Is aan de hand van bovenvermelde consideraties de diameter vastgesteld, dan blijft een veelheid van op te lossen problemen over. Om het elektrisch vermogen van de centrifuges en daardoor van de procesfabriek binnen bepaalde grenzen te houden, het scheidingsproces niet te verstoren door andere gassen met andere massa's toe te laten en tevens omdat het UF_6 snel ontleedt in aanwezigheid van water, worden de centrifuges in vacuüm bedreven. Dit brengt bijzondere problemen met zich mee. Allereerst zal, indien een centrifuge het begeeft, geen lek in de constructie mogen worden geïntroduceerd. De in een draaiende centrifuge opgeslagen energie is groot. In een centrifuge met een gewicht van 1 kg is bij een omtreksnelheid van 400 m/sec ca. $8 \cdot 10^4$ Joule opgeslagen. Daar de draaifrequenties in de orde van 1000 Hz liggen, komt bij verongelukken de energie vrij in 10^{-1} - 10^{-3} seconde, hetgeen kortdurende vermogens van 1-100MW betekent.

Daar het proces zich in vacuüm afspeelt, zal de gehele procesfabriek met vele honderdduizenden centrifuges moeten voldoen aan een zeer hoge standaard van vacuümdichtheid. Stromingsproblemen in de centrifuge zijn groot. Tengevolge van het hoge molecuulair gewicht is de geluidssnelheid in het UF_6 laag, 90 m/sec. Bij een omtreksnelheid van 400 m/sec zullen derhalve aerodynamische verschijnselen op kunnen treden bij Mach 3,5.

In een centrifugefabriek zullen hoge eisen gesteld worden aan de kwaliteit van de onderdelen, terwijl het fabriceren van dunwandige cilinders met hoge toleranties specifieke problemen oproept.

De meeste centrifuges zijn aan twee zijden gelagerd. Terwijl de rotor via een elastisch element aan de onderzijde is opgelegd in een lager van eenvoudige constructie, wordt de centrifuge aan de bovenzijde overeind gehouden door een wrijvingsloos magnetisch lager. Aan beide zijden wordt in het algemeen demping aangebracht. Aangezien centrifuge-frequenties in het algemeen door gyroscopische effecten met het toerental variëren, zal hiermee rekening worden gehouden bij de constructie van de dempers (fig. 9).

De middelen om de tegenstroomwervel in de rotor



Figuur 9. 1. Magnetisch bovenlaag; 2. Olie voor boven-damping; 3. Aftap verrijkte fractie; 4. Niet slepende af-dichting; 5. Tegenstroom wervel; 6. UF_6 -voeding; 7. Aftap verarmde fractie; 8. Stator; 9. Damping en lagering.

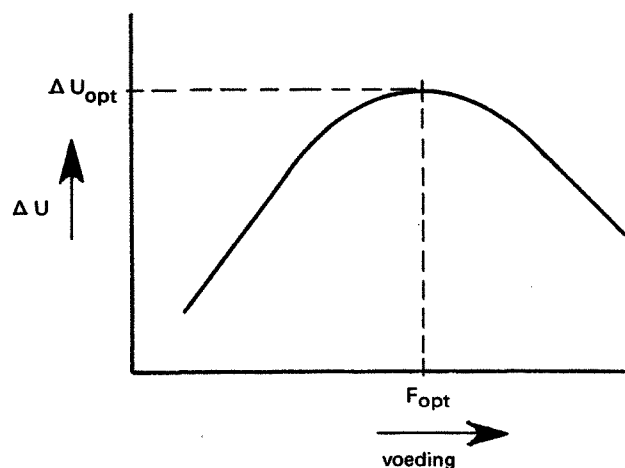
op te wekken zijn in principe eenvoudig. Zo kan men, gebruik makend van de hoge radiale versnel-lingen welke in de orde van $10^5 - 10^7$ g's liggen, thermoconvectieve stromingen in de centrifuge op-pekken door het aanleggen van temperatuurver-schillen tussen boven- en onderdeksel van de rotor. Het ontstaan van een tegenstroomwervel heeft het voordeel, dat beide aftapstromen niet meer op ver-schillende diameters uit de centrifuge moeten wor-den geëxtraheerd. Door het ontstaan van een axiale ontmenging kan worden volstaan met het gas boven en onder in de rotor af te tappen. Aangezien de sublimatiedruk van het UF_6 bij kamertemperatuur ca. 80 torr bedraagt, zullen de asdrukken ca. 10^{-3} torr zijn, de toestand is daardoor niet meer visceus. Dit maakt het mogelijk het interne gassysteem voor de toevoer en de extractie van het UF_6 in de as van de rotor te situeren. De aan de centrifuge toe te voeren vermogens worden in de eerste plaats be-paald door de lagerwrijving en verder door de gas-wrijving in en om de rotor. Door de zeer lage druk-ken echter is het benodigde vermogen zeer gering. Evenals in de meeste processen is de scheidende werking van een centrifuge afhankelijk van de voeding en vertoont het scheidend vermogen van de centrifuge een optimaal werkpunt (fig. 10).

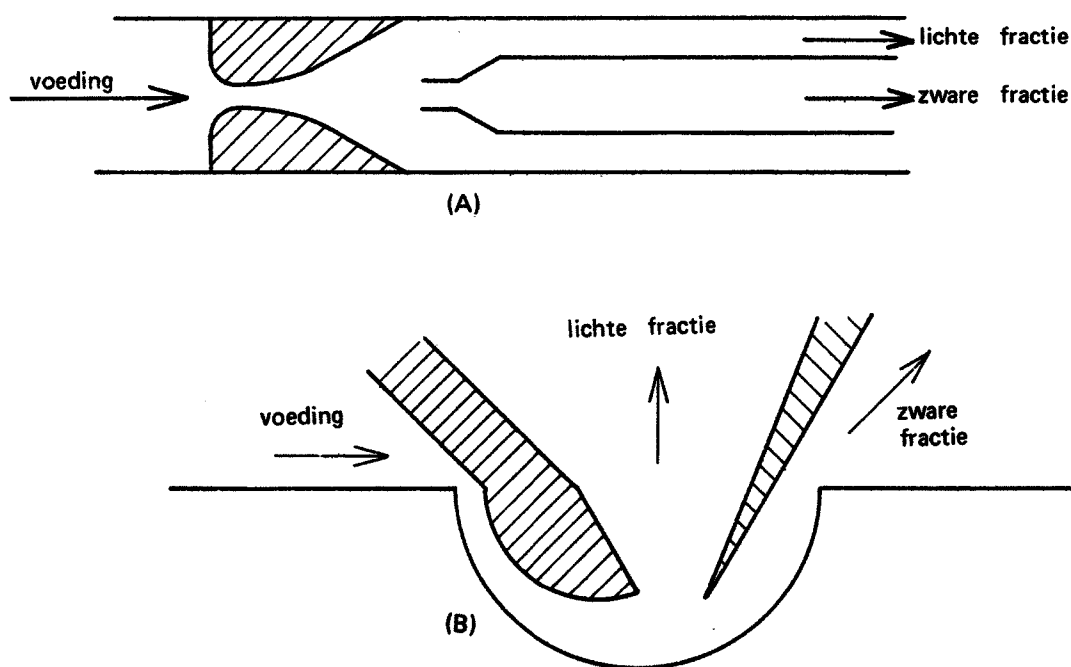
Middelen moeten beschikbaar zijn om het optimale werkpunt van alle centrifuges in een cascade onder alle omstandigheden te bereiken. Daar de schei-dingskosten berekend worden per eenheid schei-dend vermogen evenals de kapitaalinvesterings, zijn met een verlies aan scheidend vermogen van enige procenten reeds aanzienlijke bedragen ge-moeid.

e) Het 'Beckerse' jet-procédé

Dit proces is in vroegere tijden reeds in Engeland

Figuur 10.





Figuur 11. Twee variaties van het jetprincipe.

bestudeerd. Het is door prof. Becker in Karlsruhe verder ontwikkeld.

Het procédé berust op het doorpompen van een gas door een nauwe spleet naar een ruimte op lage druk. In de hierbij expanderende gasstraal zullen lichte delen zich sneller naar de straalgrens toe bewegen dan de zware delen. Door nu op zekere afstand van de straalmond het buitenste gedeelte van de gasstroom 'af te schillen', verkrijgt men een verrijkt gedeelte, terwijl dan de stroomkern de verarmde reactie is (fig. 11a).

Een verdere ontwikkeling is de straal te laten expanderen in een gebogen kanaal, waarbij gebruik wordt gemaakt van het centrifugaal effect (fig. 11b).

Het verdunnen van het UF_6 -gas met He- of H_2 -gas bleek van grote invloed. Deze componenten worden toegevoegd om de gassnelheid sterk te verhogen, de sonische gassnelheid is immers afhankelijk van het moleculair gewicht. Door dit effect wordt het centrifugaal effect versterkt, doch ook de diffusiecoëfficiënten worden beïnvloed.

De fysica van het verschijnsel is complex. Bereikt werd een separatiefactor van $\alpha = 1,020$ voor een

aftapverhouding van $\frac{P}{F} = 0,3$ en een voedingsstroom bestaande uit 5 mol % UF_6 in helium.

De expansieverhouding is 4 bij een voordruk van ca. 600 mm/kg.

De drukken en compressieverhouding voor de compressor zijn gelijk aan die voor de gasdiffusie, doch de te verpompen gashoeveelheden zijn groot niettegenstaande het feit dat de scheidingsfactor 10 keer

groter is. Dit proces bezit daarom alle nadelen van het diffusieproces.

De plaats van de ^{235}U -verrijking in de splijtstofcyclus

In het kort zullen twee aspecten worden gezien. De eerste is die van de huidige positie van de verrijking in de splijtstofcyclus, de tweede heeft betrekking op de vooruitzichten op langere termijn.

De huidige positie van de verrijkingsindustrie wordt toegelicht aan de hand van fig. 12. Hierin worden de voornaamste handelingen en materiaalkwantiteiten gegeven in de kringloop van de splijtstof. Zij is berekend voor een 1000 MWe PWR (drukwaterreactor) reactor zonder terugvoer van plutonium.

Allereerst valt op, dat het in de splijtstofcyclus om relatief geringe hoeveelheden materiaal gaat. Men zal in de fig. 12 genoemde 27,5 ton U/jr welke als reactorvoeding wordt gebruikt, moeten vergelijken met de 1.400.000 ton olie per jaar welke nodig is om een conventionele oliegestookte centrale in bedrijf te houden.

Een tweede opvallend punt (tabel IV) is de zeer hoge prijs van het rondgaande materiaal.

Aan iedere stap in de cyclus wordt aan het binnenkomende materiaal waarde toegevoegd. Voor een verrijkingsfabriek bestaat dit uit de scheidingskosten $C_{\Delta} \text{ U}\Delta$. Voor het in figuur 10 gegeven geval is

TABEL IV

Prijs van verrijkt Uranium

 $(N_w = 0,2\%; C_\Delta = 32\$/SWU; C_F = 24\$/kgU)$

^{235}U concentratie	Prijs \$/kgU	$\frac{\text{voedingskosten } FC_F}{\text{scheidingskosten } C_\Delta \Delta U}$
0,71%	24	—
0,85%	35,6	5,6
2 %	154,5	1,2
3,2 %	296	0,9
5 %	508	0,8

deze toegevoegde waarde voor de beschreven reactor $3,5 \cdot 10^6$ \$/jr. Hierin is voor de scheidingskosten gerekend met de huidige prijs van 32 \$/SWU, terwijl de cascade-wasteconcentratie voor deze grootte van de scheidingskosten is geoptimaliseerd. (1 SWU = 1 separative work unit = 1 kg uranium scheidingsarbeid.) De kosten van het voedingsmateriaal van de cascade zijn voor dit geval $3,4 \cdot 10^6$ geleverd als UF_6 .

Rekent men voor de elementenfabricage 85 \$/kgU en voor de opwerking van bestraalde splijtstof en transportkosten 33 \$/kgU, dan verkrijgt men het beeld van de huidige positie van de verrijking in de splijtstofcyclus (tabel V) buiten het renteverlies op het rondlopende kapitaal.

De plaats van de verrijking in de cyclus is belangrijk; ca. 35% van de reactorvoedingskosten wordt er door bepaald. Een aanslag op deze positie wordt echter gepleegd door een mogelijke splijtstofstroom waarbij geen verrijking plaatsvindt. Bij thermische reactoren zal de Pu-produktie nog geen wezenlijke bedreiging van de positie vormen, maar op de lange duur, met het verschijnen van de kweekreactoren, zal de betekenis van de verrijking fundamenteel worden gewijzigd. De verrijkingsfabrieken zullen dan zelfs totaal overbodig worden. Zeker is wel dat in de eerstkomende 50 jaar een toenemende vraag zal bestaan naar verrijkingscapaciteit.

Van de vele prognoses van de behoefte aan geïnstalleerd scheidend vermogen kan die genoemd worden welke de tripartite partners Groot Britannië, Duitsland en Nederland vermeldten (7) in de 4e Genève-conferentie in 1971 (tabel VI).

De capaciteit van de drie fabrieken van de Amerikaanse Atomic Energy Commission, na de uitvoering van alle voorziene verbeteringen, wordt opgegeven als 27.700 ton SW/jr welke volgens bovenstaande prognose, in het eerste begin van de tachtiger jaren, volledig voor eigen Amerikaanse behoefte zal worden benut. Een zeer bescheiden begin is gemaakt met de bouw van andere, niet Ame-

TABEL V

Kosten in de splijtstofcyclus

Handeling	Kosten \$/jr
Voeding van de cyclus incl. UF_6 -conversie	$3,4 \cdot 10^6$
Verrijking	$3,5 \cdot 10^6$
Elementenfabricage	$2,3 \cdot 10^6$
Reprocessing en transport	$0,9 \cdot 10^6$
Totaal	$10,1 \cdot 10^6$

TABEL VI

Jaarlijkse behoefte aan scheidingscapaciteit tonnen SW/jr

Jaar	Wereld	USA
1975	18.000	11.000
1980	38.000	21.000
1982	50.000	26.000
1985	70.000	35.000

rikaanse fabrieken. Zo is overeengekomen, dat in Almelo zowel een Duitse als een Nederlandse scheidingsfabriek wordt gebouwd van ieder 25 ton SW/jr, terwijl in Capenhurst een 25-tons fabriek zal komen te staan. Behalve deze voorziene capaciteit beschikt Engeland nog over een diffusiefabriek van ca. 400 ton SW/jr en Frankrijk over 300 ton SW/jr. Er zal daarom zonder uitbreiding van scheidingscapaciteit een chronisch tekort ontstaan aan scheidend vermogen. Wegens de lange bouwtijd van scheidingsfabrieken zal daarom nu reeds de beslissing moeten vallen de beschikbare capaciteit sterk te vergroten.

De eerder genoemde tripartite overeenkomst voorziet in de volledig geïntegreerde constructie van een scheidingsfabriek van 300 ton, hetgeen met recht een zeer bescheiden begin kan worden genoemd.

Vergelijking van de drie concurrerende scheidingsmethoden

Een vergelijking van de drie scheidingsmethoden zal in dit stadium altijd mank gaan aan gebrek aan harde uitgangsgegevens. Een vraag is zelfs hoe reëel de thans gehanteerde scheidingskosten zelf zijn. Een klein historisch overzicht kan dit illustreren.

1962 US AEC verlaagt de scheidingskosten van 37 \$/SWU tot 30 \$/SWU.

1967 $C_\Delta = 26$ \$/SWU met een gehanteerde afval concentratie van 0,2% ^{235}U .

1970 De US AEC maakt bekend dat de scheidingskosten worden verhoogd tot 28,7 \$/SWU bij een afval concentratie van 0,2% ^{235}U .

1971 Opnieuw worden de scheidingskosten verhoogd, nu tot $C_\Delta = 32$ \$/SWU, weer met

Vergelijking van de drie scheidingsmethoden

	Gasdiffusie- methode	Centrifuge- methode	Jet-methode
Relatieve scheiding per element ϵ	0,0018	$\sim 0,2$	$\sim 0,015$
Aantal cascadetrapen	~ 1400	~ 13	~ 450
ΔU per scheidingselement SWU/jr	~ 4000	$\sim 2-8$	~ 1500
Cascaderendement	90-95%	100%	90-95%
Specifiek vermogen	0,24	0,2-0,3%	0,5-0,75
Specifiek energiegebruik kWhr/SWU	2100	175-260	4350-6500
Energetisch rendement van het proces	97,3%	99,8-99,7%	93-94,5%
Specifieke investering \$/SWU/jr	120	120-200	60-100
Specifieke extra investering in centrale (à \$ 250 \$/kW _e) \$/SWU/jr	60	5-7,5	125-185
Specifieke energiekosten \$/SWU:			
5,5 mills/kWhr	11,5	0,96-1,65	24-35
7 mills/kWhr	14,7	1,2-1,8	30-45
Percentage energiekosten in de verrijkprijs	40-50%	$\sim 5\%$	60-70%

een afval concentratie van 0,2% ²³⁵U. Van af 1 juli echter zullen de installaties bedreven worden met $N_w = 0,3\%$ ²³⁵U. De optimale concentratie voor de gegevens C_Δ is evenwel 0,25% ²³⁵U, welke concentratie aan de klant wordt doorberekend. Hoewel dat een simplificatie is, betekent dit dat de klant een hoger scheidend vermogen moet betalen dan de US AEC voor zijn vraag produceert. De meerdere voeding echter wordt door de US AEC geleverd.

Een veel gehoord argument tegen de centrifuge is dat voor de bouw van grote scheidingsinstallaties een ongehoord groot aantal centrifuges nodig is. Voor de bouw van een equivalente scheidingscapaciteit van $8,75 \cdot 10^6$ SWU/jr, waarvoor de US AEC een bouwtijd van 6 jaar incalculeert, zijn enige miljoenen centrifuges nodig. Gespreid over hetzelfde tijdvak van 6 jaar, is dit een centrifugeproductie van enige duizenden centrifuges per dag, hetgeen een 10-100 maal grotere capaciteit betekent dan de bescheiden Nederlandse centrifugefabriek welke thans in Almelo reeds produceert. Nu moeten de diffusiefabrieken om een goedkoop produkt te verkrijgen direct grote tot zeer grote produktie-eenheden bouwen. Dit hangt samen met het optimale diffusor-compressor ontwerp. Bij de centrifuge ligt dit totaal anders. Berekeningen wijzen uit dat de minimum economische produktie-eenheid reeds een ordegrrootte kleiner is dan voor de diffusie-installaties geldt. Dit maakt het mogelijk reeds in een zeer vroeg bouwstadium kleine scheidingscapaciteiten in bedrijf te nemen.

Ook een tijdige aanpassing van een bouwprogramma aan de vraag naar scheidingscapaciteit is daarom zeer goed mogelijk.

Een zeer belangrijke factor is het energieverbruik

van het scheidingsproces. Bekend is dat dit voor het diffusiebedrijf ca. 0,27 kW_e jr/SWU is. Dit betekent voor een scheidingscapaciteit van $8,75 \cdot 10^6$ SWU/jr een in centrales te installeren vermogen van 2300 MW_e. Voor centrifuges is de specifieke energiebehoefte nu reeds een ordegrrootte lager, terwijl juist door de ontwikkelingspotentie van de centrifuge deze post nog sterk gereduceerd kan worden. Voor de diffusiemethode mag dit, door de aard van het proces, niet worden verwacht. Nu reeds maken de energiekosten 40-50% uit van de totale US AEC-scheidingskosten. Hierbij wordt dan nog een energieprijs gehanteerd van 5,5 mill's/kWhr (1 mill = 1/1000 dollar). Voor Europa zal deze zeker op 7 mill's/kWhr moeten worden gesteld, waardoor de gevoeligheid van de scheidingskosten voor escalaties in de kWhr-prijs nog sterker zal zijn.

Dat centrifuges in aantallen kunnen worden gebouwd en bedreven, wordt bewezen door de laboratoriumcascaden welke in de drie landen hebben gefunctioneerd. Dat centrifuges in grotere aantallen in speciaal daarvoor geconstrueerde fabrieken kunnen worden vervaardigd, is in Almelo bewezen. Als criteria blijven dan over het bewijs van een lange levensduur van de centrifuges, het statistisch bewijs van het behoud van de vacuumintegriteit van de centrifuge en het cascadesysteem over haar levensduur, de prijs van de centrifuge en het cascadesysteem. Alle drie factoren van zeer groot belang voor het bepalen van de scheidingskosten. Wel is het zo dat duurproefervaringen met verschillende typen centrifuges reeds sterk wijzen op een lange levensduur met behoud van de vacuümintegriteit.

Al deze vragen kunnen echter eerst afdoende worden beantwoord na de produktie van substantiële hoeveelheden centrifuges welke over langere tijden moeten zijn bedreven. Hiertoe dienen dan de drie

proeffabrieken welke door de tripartite landen naar eigen ontwerp zijn of worden gebouwd, terwijl niet kan worden gezegd dat hiermee het laatste woord op centrifugegebied is gezegd. Zeker is, dat juist de specifieke centrifugeprijs door verdere ontwikkeling van de centrifuge en haar produktiefaciliteit nog verder kan worden verlaagd.

Literatuur

1. Lindemann, F. A.; Aston, F. W., The possibility of separating isotopes, *Phil. Mag* 37.6 (1919), 523.
 2. Mullikan, R. S., The separation of isotopes by thermal and pressure diffusion, *J. Am. Chem. Soc.* 44 (1922), 1033.
 3. Beams, J. W., High rotational speeds, *J. Appl. phys.* 8 (1937), 795.
 4. Groth, W.; Nann, E.; Welge, K. H., Enrichment of Uranium isotopes in a counter current gas centrifuge, *Z. Naturf.* 12A (1957), 81.
 5. Kistemaker, J.; Los, J.; Veldhuyzen, E. J. J., The enrichment of Uranium isotopes with ultra centrifuges, *Proc. Conf. Geneva 1958*, 4, 435.
 6. Avery, D. G.; Bogaardt, M.; Jelinek-Fink, P.; Parry, J. V. L., Centrifuge plants in Europe, *Proc. Conf. Geneva, A/Conf. 49/P/493*.
 7. Bogaardt, M.; Einfeld, K.; Tatlock, J., Objectives and progress in the centrifuge enrichment plant industry, *Proc. Conf. Geneva, A/Conf. 49/P/382*.
 8. London, H., Separation of isotopes, George Newness Lim., London.
 9. Pratt, H. R., Countercurrent Separation processes, Elsevier Publ. Co. 1967.
 10. A.E.C. Gaseous diffusion plant operation: ORO - 658; ORO - 684; ORO - 685.
 10. Mårtensson, M., Economics of nuclear fuels, *Proc. of symp. Gottwaldov, May 1968*, pag. 275.
-

Geschiedenis van de ultracentrifuge-ontwikkeling in Nederland

A description is given of the history of the research and development work carried out in the Netherlands on the ultra-centrifuge for uranium enrichment, from the initial fundamental research to the building of an enrichment plant. Included is a short description of the co-operation with England and West-Germany.

In 1954 wordt voor het eerst in het jaarverslag van de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) melding gemaakt van contacten van FOM-medewerkers met andere onderzoekcentra waar gewerkt werd aan de ontwikkeling van centrifugale methoden voor de scheiding van isotopen. Toch is het niet juist een beschrijving van de geschiedenis van de Nederlandse ontwikkeling op het gebied van de ultracentrifuge daar te laten beginnen. Reeds direct na de oorlog werd de isotopenscheiding als een zwaartepunt voor onderzoekactiviteiten onderkend. Toen verenigde een aantal leidende fysici zich, aangemoedigd door de Nederlandse regering, om te trachten het fysische onderzoek, dat door de oorlog tot stilstand was gekomen, weer op gang te brengen en zo mogelijk de achterstand in te lopen. Dit streven verkreeg een hoge prioriteit, mede door de resultaten op kernfysisch gebied in andere landen. Het resulteerde o.m. in de oprichting van de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie en Instituut voor Kernfysisch Onderzoek.

Er zijn een aantal methoden denkbaar om isotopen - dus ook uraniumisotopen - te scheiden. Het zou niet eenvoudig zijn geweest van alle denkbare methoden na te gaan welke de meeste beloften inhield voor een spoedig resultaat met lage kosten. Daarom was het ter beschikking staan van het z.g. Smyth-rapport*), de officiële Amerikaanse publikatie vlak na de oorlog over de ontwikkeling van de atoom-bom, een gelukkige omstandigheid. Ondanks het feit, dat het rapport vrijwel geen technische gegevens bevatte - die waren nog geheim - verschaftte het informatie over de vier hoofdrichtingen die de Amerikanen op het gebied van de scheiding van uraniumisotopen waren ingegaan:

- elektromagnetische scheiding;
- ultracentrifugale scheiding;
- thermodiffusie-scheiding;
- diffusie door poreuze wanden.

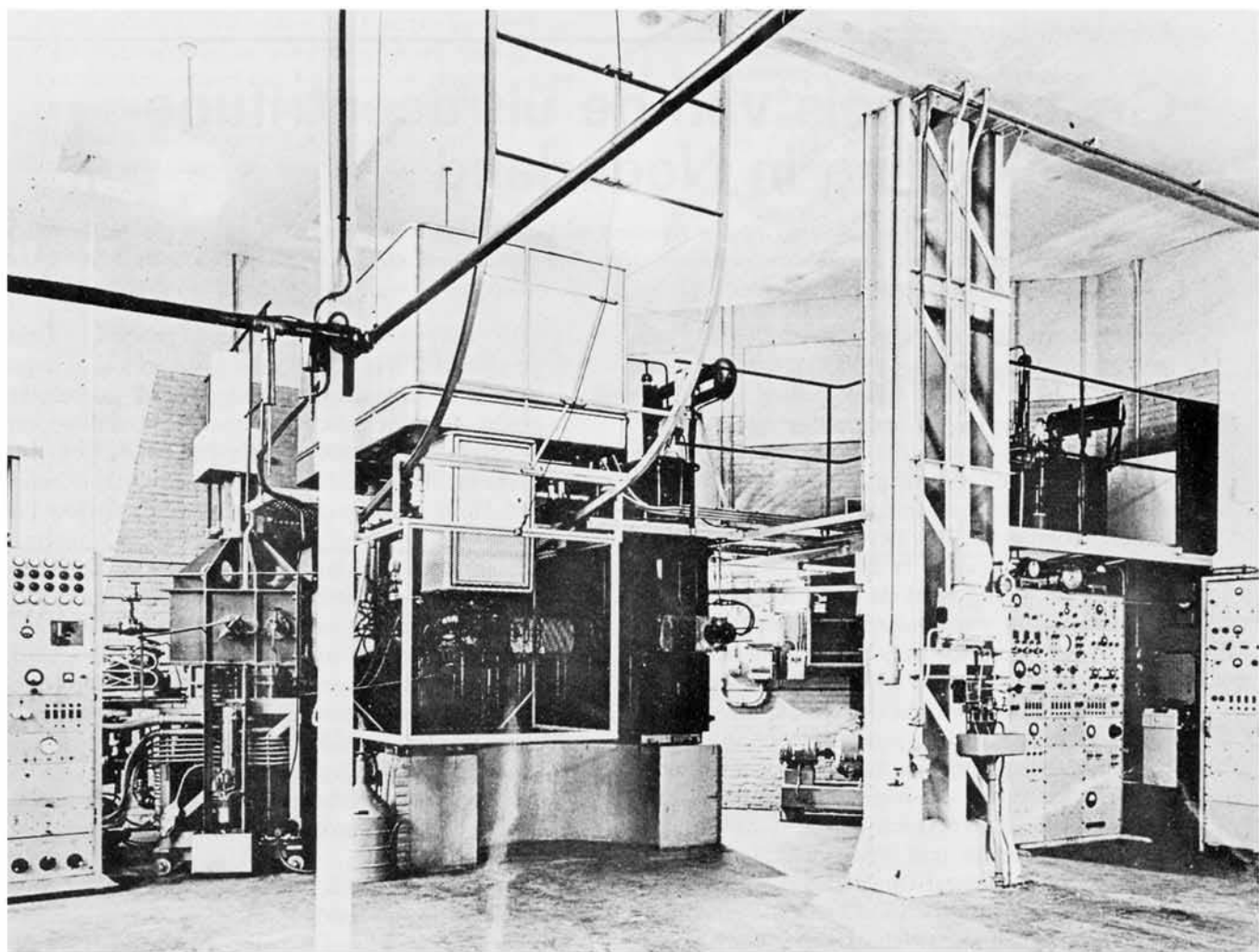
Als zodanig was het rapport een belangrijke steun bij het doen van een keuze. Uit het rapport bleek dat de Amerikanen de centrifuge oorspronkelijk zo gunstig beoordeeld hadden dat zij tijdens de oorlog

zelfs een proeffabriek hadden gebouwd. Deze proeffabriek was echter weer gesloten, nadat ongeveer de te verwachten verrijkingsgraad was bereikt, omdat de technische problemen voor een verdere ontwikkeling te groot waren om op de gewenste korte termijn een fabricage op grote schaal te bereiken. Het bleek gemakkelijker de gasdiffusie door poreuze wanden op een dergelijke schaal te realiseren. Tijdens de oorlogsjaren werd ook in Duitsland gewerkt aan de ontwikkeling van diverse methoden voor de verrijking van uranium, o.a. met gas-thermodiffusie en met ultracentrifuges. De ultracentrifugemethode is de enige geweest waarmee te Hamburg enige honderden grammen zwak verrijkt uranium werden gemaakt. Hoewel ook hier de te verwachten verrijkingsgraad werd bereikt, waren de technische moeilijkheden groot. Later heeft men in Duitsland de centrifuge-ontwikkeling voortgezet.

Zoals reeds vermeld, werd ook in Nederland direct na de oorlog de isotopenscheiding als een zwaartepunt voor onderzoekactiviteiten onderkend. In het Zeeman-laboratorium van de Gemeente Universiteit van Amsterdam werd sedert 1947 gewerkt aan de ontwikkeling van een elektromagnetische massaseparator. Met behulp van dit apparaat is het mogelijk op efficiënte wijze kleine hoeveelheden isotopen te scheiden. Dit werk stond onder leiding van prof. dr. C. J. Bakker, de latere directeur van het IKO (Instituut voor Kernfysisch Onderzoek) en nog weer later directeur-generaal van het CERN (Europese Organisatie voor Nucleair Onderzoek) in Genève. Dr. J. Kistemaker, die daarvoor reeds in de gelegenheid was gesteld een studieverblijf in Kopenhagen door te brengen om de elektromagnetische massaseparator te leren kennen, was vanaf het begin bij dit project betrokken. Al spoedig werd de noodzaak onderkend de zaak groter op te zetten. Dit kon gerealiseerd worden toen het mogelijk bleek van het Gemeentelijk Energiebedrijf van Amsterdam een grote ruimte in de elektrische centrale aan de Hoogte Kadijk te verkrijgen.

De eerste tijd na de oorlog had men in Nederland nog maar nauwelijks aandacht besteed aan de mogelijke bouw van een reactor, omdat dit voorlopig

*) Smyth-report, Princeton University Press, 1945.



Figuur 1. De Amsterdamse elektromagnetische isotonenseparator, waarmee gedurende meer dan een jaar in continu bedrijf isotopen van uranium zijn gescheiden in de jaren 1953 en 1954. De installatie was ondergebracht bij het Gemeentelijk Energiebedrijf aan de Hoogte Kadijk te Amsterdam.

toch niet bereikbaar leek. In het begin van de jaren '50 kwam echter, door samenwerking tussen de kleinere landen, de mogelijkheid van de bouw van reactoren in zicht. Om ook reactoren met verrijkte splijtstof mogelijk te maken, zou evenwel de scheiding van isotopen op een veel grotere schaal moeten geschieden. Om die reden onderzocht de werkgroep 'Massascheiding I', onder leiding van prof. Bakker, naarstig ook andere methoden dan de elektromagnetische massaseparator voor isotopenscheiding. Op 5 maart 1953 werd prof. Bakker door de Raad van Bestuur van de FOM op zijn verzoek - in verband met andere taken - ontheven van zijn functie als leider van de werkgroep 'Massascheiding I'. Dr. Kistemaker werd in zijn plaats benoemd. Op 1 ja-

nuari 1955 werd dr. Kistemaker bevorderd tot directeur van het FOM-laboratorium voor Massaspectrografie.

De elektromagnetische massaseparator werkte in 1953 en begin 1954 naar tevredenheid. De productie was weliswaar klein - 1 à 2 mg uranium-235 per dag - maar betrouwbaar. Er is toen zelfs gespeeld met de gedachte de elektromagnetische isotopenscheiding op veel grotere schaal - industrieel - aan te pakken. Dit idee heeft men echter laten varen.

In de herfst van 1954 woonde dr. Kistemaker, tijdens een bezoek aan Hamburg, een colloquium bij in het Institut für Physische Chemie van de universiteit in die stad over de nieuwste ontwikkeling op het gebied van de ultracentrifuge. Tijdens dit colloquium bleek hem dat het in Duitsland op dit gebied verrichte onderzoek interessante perspectieven bood, hetgeen hij met nadruk onder de aandacht van FOM en van de Werkspoor NV bracht. Dit was de directe aanleiding dat als alternatieve me-



thode voor uraniumverrijking de ontwikkeling van de ultracentrifuge ter hand werd genomen. In 1955 heeft men zich grondig verdiept in de theorie van de processen die in de ultracentrifuge plaatsvinden. Vanaf de aanvang was Werkspoor NV te Amsterdam bij het werk betrokken, eerst voor het geven van technische adviezen. Al spoedig bleek echter dat deze adviezen niet gegeven konden worden zonder het verrichten van experimenten. Om die reden werd bij Werkspoor een proefopstelling gebouwd om na te gaan hoe verschillende kogellagers zich gedragen bij hoge snelheden en hoe hun smering moet zijn. Ook afdichtingsproblemen en de frequentie-stabilisatie werden met deze proefopstelling bestudeerd.

Toen het werk meer het ontwikkelingsstadium inging en daardoor het fundamentele onderzoekkarakter verloor, achtte FOM het niet langer tot zijn competentie te behoren. Er was reeds in een eerder stadium met het in 1955 opgerichte Reactor Centrum Nederland contact opgenomen over een mogelijke voortzetting van het werk daar. In het jaar

Figuur 2. Prof. dr. J. Kistemaker (links) overhandigt het eerste afgescheiden uranium-235 aan prof. dr. J. M. W. Milatz. Prof. dr. J. Clay kijkt toe. Op de achtergrond rechts staat prof. dr. P. K. Rol.

Met dit uranium-235 werden bij JEEP in Kjeller metingen van nucleair-technisch belang gedaan.

1956 heeft het RCN de verantwoordelijkheid voor het onderzoek op zich genomen. Sedertdien werd het werk in opdracht en voor rekening van het RCN uitgevoerd in de laboratoria van FOM onder de dagelijkse leiding van prof. dr. J. Kistemaker en dr. J. Los, en bij Werkspoor NV te Amsterdam, onder leiding van ir. E. J. J. Veldhuijzen, en wel georganiseerd in een drietal werkgroepen, nl. een fysische groep, een chemische groep en een constructiegroep.

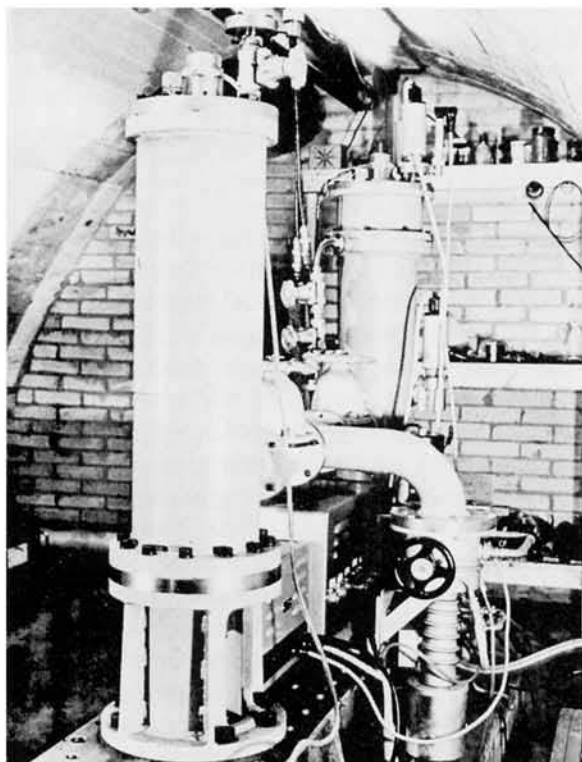
In 1957 werden bij het werk van de constructiegroep het Centraal Technisch Instituut TNO en het Instituut voor Werktuigkundige Constructies (IWECO) van TNO betrokken. Als gevolg van een tekort aan financiële middelen moest in 1958 de omvang van het werk worden beperkt. Zo moest bijvoorbeeld besloten worden de activiteit van de

met TNO gevormde werkgroep stop te zetten. Later is TNO echter op verschillende punten weer ingeschakeld.

Van 23-27 april 1957 organiseerde prof. Kistemaker in Amsterdam de eerste internationale conferentie over isotopenscheiding. Bij die gelegenheid kwamen allerlei zaken aan het licht die in de voorgaande jaren meest in het geheim in alle landen waren gebeurd. Toen ook werden de eerste informatie bekend over de revolutionaire ontwikkelingen die in de na-oorlogse jaren in Suchumi (USSR) hadden plaatsgevonden. Een aantal gevangen genomen vooraanstaande Duitse onderzoekers had daar allerlei methoden voor uranumscheiding tot ontwikkeling gebracht. Eén daarvan was de ultracentrifuge van prof. Steenbeck. Dit type centrifuge is de basis geworden voor de centrifugeontwikkeling in alle landen.

Het is aan dr. Gernot Zippe, een van Steenbeck's vroegere medewerkers te danken, dat deze methode vóór 1960 nog in een aantal Amerikaanse patenten werd vastgelegd. Zippe werkte toenmaals bij de Amerikaanse ultracentrifugespecialisten Kuhltau en Beams. Het Nederlandse project verliet na april 1957 op grond van de verkregen informatie de tot dan toe gevolgde ontwikkelingslijn, de zgn. lijn Groth en vervolgde vanaf toen de lijn Steenbeck. Het vereiste een 'salto mortale' van de FOM- en Werkspoor-groepen, maar het gelukte.

Figuur 3. Opstelling voor twee ultracentrifuges in een schuilkelder, anno 1958.

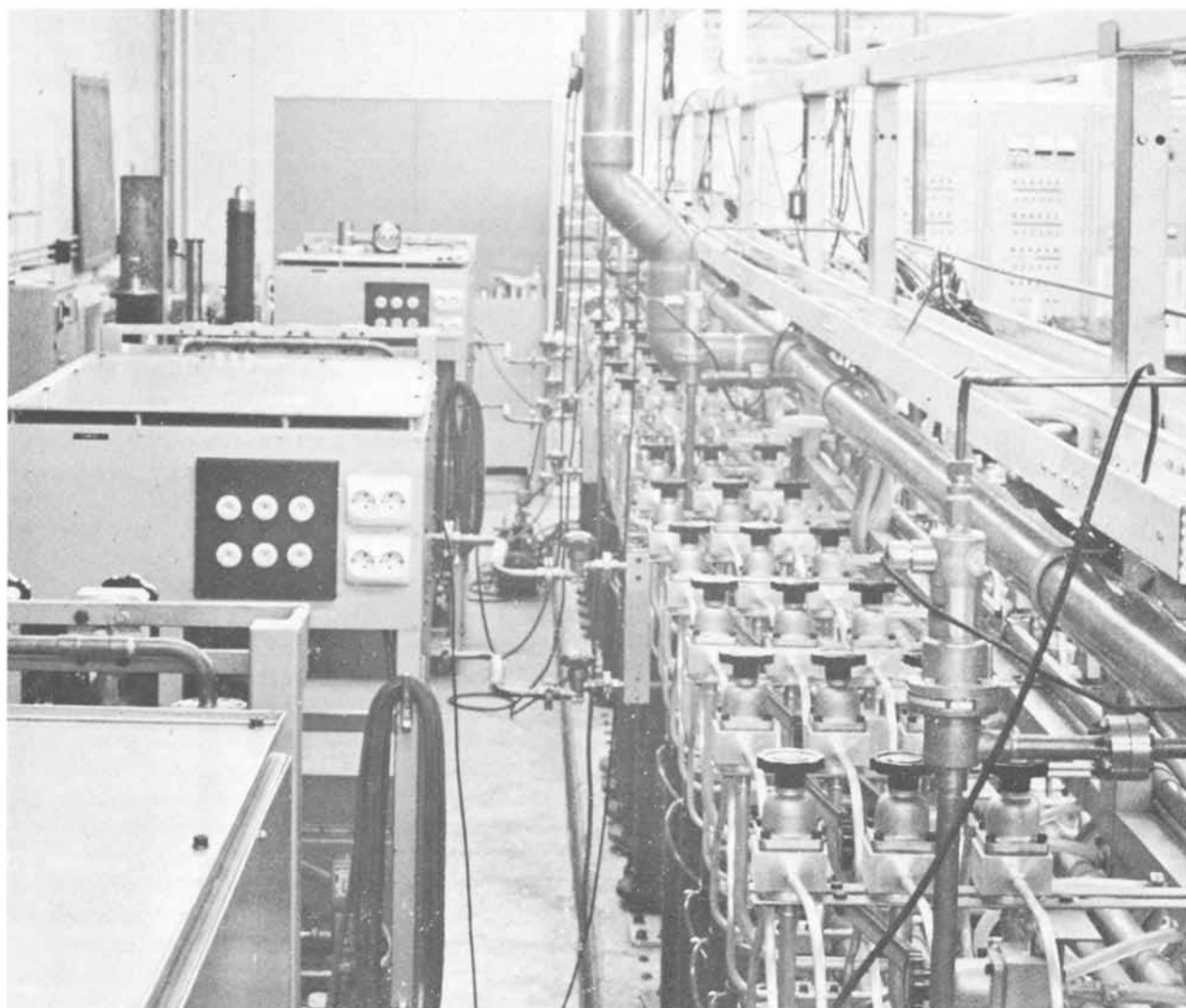


Reeds in de jaren '56-'58 werd uitvoerig gediscussieerd over de mogelijkheden van de bouw van een isotopenscheidingsfabriek in Europees verband. Voor het bestuderen van deze vraag was - vooruitlopend op de oprichting van Euratom - het Syndicat d'Etudes pour la Construction de l'Usine Européenne de Séparation isotopique de l'Uranium ingesteld. Reeds toen schoven de Nederlanders en de Duitsers het ultracentrifugeproject naar voren als alternatief van het Franse voorstel om in Europees verband een gasdiffusiefabriek voor het verrijken van uranium te bouwen; een strijd die, zoals bekend, ook thans nog niet beslist is. In het studiesyndicaat traden Nederland en Duitsland als 'officiële tweeling' op, bijv. door het indienen van gezamenlijke nota's. De pointe van deze samenwerking was, dat - ook al zou Frankrijk iets eigens op verrijking gebied willen verrichten - dit de ontwikkeling van de ultracentrifuge niet in de weg mocht staan. Men was in Nederland algemeen van mening dat het verrijkte uranium waar Europa behoefte aan zou hebben met de ultracentrifugemethode goedkoper gemaakt zou kunnen worden. In die tijd zijn er - in nauw overleg met de betrokken regeringsinstanties - enkele besprekingen geweest om met Duitsland ook tot een technische samenwerking te komen. Deze samenwerking bij het onderzoek is in die tijd echter niet tot stand gekomen. Pas in een veel later stadium van de ontwikkeling, in 1968, werd tijdens een bespreking in Den Haag van de betrokken ministers van Nederland, West-Duitsland en Engeland de basis gelegd voor een concrete vorm van samenwerking.

De jaren '57 tot '62 kenmerkten zich wat dit werk betreft door een voortdurende discussie in het Bestuur en de Wetenschappelijke Advies-Raad van het RCN over de levensvatbaarheid van het project. Telkens weer kon het RCN slechts met moeite zijn geldgevers bereid vinden tot de financiering van de voortzetting van het project.

Op 10 maart 1961 werd op verzoek van de regering van de Verenigde Staten het UC-project door de Nederlandse regering geheim verklaard. In Duitsland, Engeland en de Verenigde Staten gebeurde het zelfde, zodat vanaf dat moment geen enkele uitwisseling meer mogelijk was.

In de eerste helft van 1960 werd voor het eerst de scheiding van uraniumisotopen door middel van een ultracentrifuge in Nederland tot stand gebracht. Aan de orde kwam toen de vraag hoe de financiering in de nu volgende ontwikkelingsfase geregeld zou moeten worden. De mogelijkheden van het project zijn toen door de afdeling Beoordeling en Onderwerp van het RCN aan een grondig onderzoek onderworpen. Mede op grond van de resultaten hier-



Figuur 4. Een laboratorium cascade-scheidingsopstelling.

van werd door de Wetenschappelijke Advies-Raad (WAR) van het RCN geadviseerd een technisch-economische evaluatie van het project te doen uitvoeren, voordat over verdere voortzetting zou worden beslist.

Begin 1961 werd door de minister van Economische Zaken aan de Commissie-Tromp (de Commissie voor de Nucleaire Industriële Ontwikkeling; de voorloper van de huidige Industriële Raad voor de Kernenergie) opgedragen deze evaluatie van het ultracentrifugeproject te verrichten. De Commissie-Tromp werd hierbij bijgestaan door verschillende werkgroepen, die resp. de algemene economische aspecten, de technisch-economische aspecten en de octrooisituatie in studie namen. De Commissie-Tromp adviseerde op 28 juli 1961 tot voortzetting van het project.

Het project kwam nu in het stadium van de technische ontwikkeling. Hierdoor en door de geheim-

verklaring kwam het project buiten het oorspronkelijke FOM-kader te liggen. Er moest derhalve naar een nieuwe organisatievorm worden gezocht. De regering verzocht midden 1962 het RCN een meer rechtstreekse verantwoordelijkheid voor het project op zich te nemen, voorlopig voor een periode van drie jaar. Aan het einde van die periode verwachtte de regering een definitief antwoord op de vraag of volgens de ultracentrifugemethode verrijking van uranium mogelijk zou zijn tegen een kostprijs beneden de prijs waarvoor verrijkt uranium in de Verenigde Staten te koop is. In dit nieuwe kader werd de industriële participatie uitgebreid en kreeg TNO opnieuw een aandeel in de werkzaamheden. Er werd een Commissie van Bijstand ingesteld, o.m. belast met de beoordeling van de werkplannen en de begroting van het project, van de volgende samenstelling: prof. dr. M. Bogaardt (voorzitter), prof. dr. J. Kistemaker, ir. H. Rinia, prof. ir. L. Troost en ir. E. J. J. Veldhuijzen. De financiering ge-

schiedde nu uit de post die op de begroting van het ministerie van Economische Zaken is opgenomen voor het doen van uitgaven ter stimulering van ontwikkelingsactiviteiten op kernenergetisch gebied, het zgn. Nucleair Ontwikkelingsfonds. Voor de functie van projectleider werd ir. A. H. de Haas van Dorsser tijdelijk ter beschikking gesteld door de Nijverheidsorganisatie TNO.

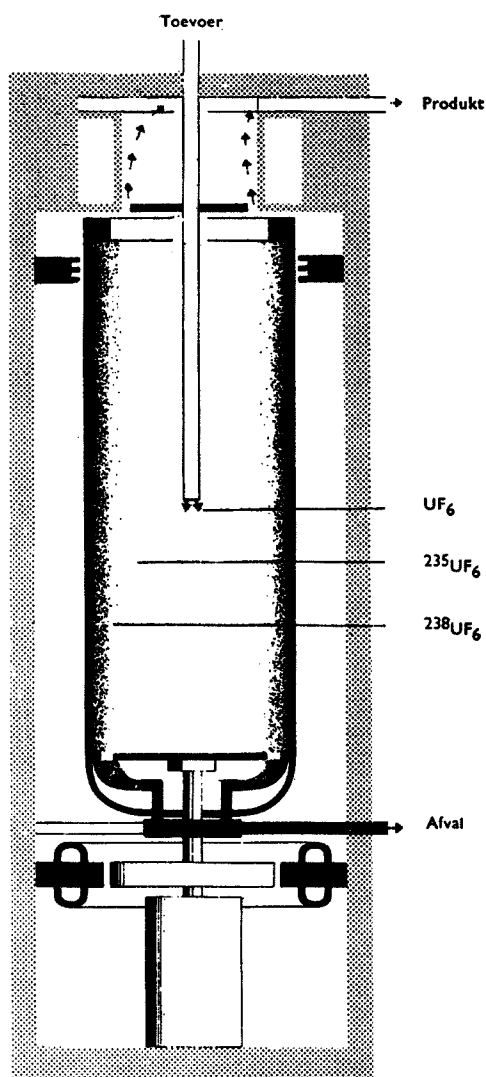
In 1962 werd een aanvang gemaakt met de bouw van een laboratorium in Duivendrecht. Dit laboratorium kwam midden 1963 gereed. Het project werd daar op grotere schaal voortgezet; het aantal medewerkers werd uitgebreid. De financiering bleef een probleem. De gelden, ter beschikking gesteld door het Nucleair Ontwikkelingsfonds bleken onvoldoende, zodat het RCN zich genoodzaakt zag uit eigen middelen de personeelsuitbreiding te financieren. In 1964 bleek het noodzakelijk nog een vierde jaar aan de oorspronkelijk gestelde periode van drie jaar toe te voegen, daar het werk vertraagd was door het later dan aanvankelijk gedacht gereedkomen van het nieuwe laboratorium.

Vanaf 1 april 1963 was ir. A. H. de Haas van Dorsser niet langer als projectleider beschikbaar. Ter vervulling van deze vacature werd ir. A. Verduin, eveneens op tijdelijke basis, ter beschikking gesteld door TNO. Begin 1967 werd deze opgevolgd door ir. F. H. Theyse (eerst in dienst van Werkspoor, later van RCN), die deze taak vervulde tot 1971. In 1971 werd het project als afdeling Ultra-Centrifuge-Ontwikkeling in de RCN-structuur opgenomen met instandhouding van de Commissie van Bijstand. Hoofd van deze afdeling is nu ir. F. Kelling. Sinds 1963 waren prof. Kistemaker en prof. Los als wetenschappelijk adviseurs aan het UC-laboratorium verbonden; op 1 januari 1972 trok prof. Kistemaker zich terug.

In 1965 werd door het Bestuur van het RCN, op initiatief van de Commissie van Bijstand, een Evaluatiecommissie ingesteld, die het meerjarenprogramma 1962-1965 ter beoordeling kreeg voorgelegd. Deze Evaluatiecommissie werd samengesteld uit de leden van de Commissie van Bijstand zelf, aangevuld met dr. T. J. Barendregt, prof. dr. J. A. A. Ketelaar, prof. dr. L. H. de Langen, prof. ir. C. de Pater, prof. ir. H. W. Slotboom en prof. dr. J. J. Went. Voorzitter was prof. Slotboom. Deze commissie adviseerde in februari 1966 tot voortzetting van het project tot aan het stadium waarin de bouw van een proeffabriek op semi-industriële schaal verantwoord zou zijn. De duur van deze periode werd door de Evaluatiecommissie geschat op vier jaar. Het aanbevolen vierjarenprogramma was gericht op de verwezenlijking van de volgende doelstellingen: ontwikkeling van een ultracentrifuge met een

hoger scheidingsrendement, oplossing van problemen verband houdende met het cascadebedrijf en de ontwikkeling van methoden voor een goedkope seriefabricage van ultracentrifuges.

De hier achterliggende gedachte was dat van een verdere stap vooruit alleen sprake zou kunnen zijn als gekomen zou kunnen worden tot de bouw van een cascade van een honderdtal centrifuges. De stap van één naar een miljoen machines, de orde van grootte waaraan men moet denken bij een commerciële scheidingsfabriek, moet in een aantal stadia overbrugd worden. Reeds toen werd gedacht aan de volgende stappen: van één centrifuge naar 100, daarna van 100 naar 10.000 en vervolgens van



Figuur 5. Scheiding van uraniumisotopen door middel van een ultracentrifuge. Natuurlijk uranium wordt in gasvormige toestand (uraniumhexafluoride UF_6) in een snel draaiende trommel geïnjecteerd. Onder invloed van de centrifugale kracht wordt de zwaardere isotoop uranium-238 naar de wanden gestuurd en aan de bodem van de trommel opgevangen.

10.000 naar 1 miljoen, waarbij men zich moet realiseren dat een scheidingsfabriek met 1 miljoen centrifuges opgebouwd kan zijn uit units van 10.000 stuks.

De door de commissie voorgestelde plannen werden, na op voorstel van het RCN op bepaalde punten gewijzigd te zijn (een getemporeerde uitvoering als gevolg van financieringsproblemen), door de minister van Economische Zaken aanvaardbaar geacht. De uitvoering van het programma geschiedde wederom in opdracht van het ministerie van Economische Zaken onder verantwoordelijkheid van het RCN.

Het project is daarna in een stroomversnelling gekomen, doordat op een aantal punten belangrijke vooruitgang werd geboekt. In 1967 verrichtte de Shell op verzoek van RCN een nieuwe economische evaluatie van de merites van het ultracentrifugeprocédé. Mede op grond van de conclusies waartoe deze evaluatie leidde, heeft het RCN in de eerste helft van 1968 voorgesteld voorbereidende werkzaamheden te beginnen om in 1969 over te gaan tot de bouw van een proeffabriek met een verrijkingscapaciteit van 25 ton per jaar. In het najaar van 1968 heeft de minister van Economische Zaken hierover overleg gepleegd met enige industrieën. Dit overleg heeft er toe geleid dat NV Philips' Gloeilampenfabrieken, Shell Kernenergie NV, NV Nederlandse Staatsmijnen, Verenigde Machinefabrieken NV (VMF) en Rijn-Schelde Machinefabrieken en Scheepswerven NV (later Rijn-Schelde-Verolme, RSV) en RCN zich bereid verklaarden in een nog op te richten onderneming samen met de Staat te participeren, waarbij die ondernemingen tezamen ongeveer de helft van de benodigde fondsen zouden fourneren. Het overleg heeft geleid tot de oprichting, in november 1968, van de NV Ultra-Centrifuge Nederland (UCN) - onder directie van prof. dr. M. Bogaardt - waarvan behalve de Staat der Nederlanden en de hiervoor genoemde bedrijven ook het RCN aandeelhouder werd. Weliswaar is laatstgenoemde slechts een kleine aandeelhouder (1%), belangrijk is echter dat bijna alle in Nederland op het terrein van de ultracentrifuge verworven patenten en know-how eigendom zijn van het RCN.

Internationale samenwerking

Intussen waren de besprekingen met Duitsland over een samenwerking op dit gebied, die in vroegere stadia nooit tot concrete resultaten hadden geleid, weer hervat. Vooral toen in 1967 van Franse zijde steeds nadrukkelijker werd gepleit voor de opzet van een Europese verrijkingsinstallatie op basis van het in Frankrijk beschikbare gasdiffusieproces, werd een samen optreden op het internationale vlak

van Nederland en Duitsland urgent. Besloten werd een aantal gegevens over de toen aangetoonde economische merites van het ultracentrifugeproces vrij te geven. Dit had o.m. tot resultaat dat het ultracentrifugeprocédé in de in die tijd verrichte studies van Foratom en van Euratom als volwaardig alternatief voor andere scheidingsmethoden werd beschouwd.

Tijdens een conferentie in Turijn over isotopenscheiding in oktober 1967 werd het eerste informele contact gelegd voor de latere samenwerking met Engeland bij een bespreking van prof. Bogaardt met Dr. N. L. Franklin. In zijn voordracht op de conferentie had Bogaardt vermeld dat Nederland plannen uitwerkte voor de bouw van een scheidingsfabriek van 25 ton scheidingsarbeid per jaar. Dit was voor de Engelsen het signaal dat de ontwikkeling in Nederland tot gunstige resultaten geleid had.

Het initiatief tot formele besprekingen over een samenwerking met Duitsland werd door de minister van Economische Zaken genomen tijdens een vergadering in EEG-verband in Luxemburg. Een Engelse missie, die een bezoek bracht aan het ministerie van Economische Zaken deed het verzoek ook met Engeland te gaan samenwerken. In het bijzonder heeft hun mededeling, dat bij de UK Atomic Energy Authority (AEA) eveneens een ultracentrifuge was ontwikkeld, waarvan de merites zo hoog werden aangeslagen dat de oorspronkelijke plannen tot uitbreiding van de in dat land reeds aanwezige gasdiffusiefabriek ter zijde waren geschoven, geleid tot een ware stroomversnelling in de internationale contacten betreffende het ultracentrifugeproces. Het gevolg was dat Engeland, Duitsland en Nederland, de drie landen in West-Europa die met de ontwikkeling van de centrifuge het meest succesvol zijn geweest, besloten te gaan samenwerken.

De verdere ontwikkeling van het project zou voor Nederland alleen een veel te grote opgave geweest zijn. Weliswaar bezat Nederland inmiddels een aanzienlijke hoeveelheid know-how, het ontbrak ons echter aan voldoende financiële middelen en bovendien zou de Nederlandse markt veel te klein zijn. Samenwerking met Duitsland en Engeland, beiden met een grote markt voor verrijkt uranium en eveneens met voldoende financiële middelen om de nog aanzienlijke ontwikkelingskosten te betalen, lijkt dan ook een goede gedachte geweest te zijn. Op 25 november 1968 kwamen in Den Haag de betrokken ministers van Nederland, West-Duitsland en Engeland bijeen om de samenwerking bij het exploiteren van het procédé van de uraniumverrijking door middel van ultracentrifuges te bespreken. Tijdens deze bijeenkomst werd besloten te

trachten zo spoedig mogelijk tot een concrete vorm van samenwerken over te gaan. Op 11 maart 1969 kwamen de ministers weer bij elkaar, nu in Londen. Tijdens die vergadering werd overeenstemming bereikt over de samenwerking. Overeenkomen werd dat er twee verrijkingsinstallaties zouden worden gebouwd, en wel in Engeland en Nederland. Deze fabrieken zouden tezamen een totaal scheidend vermogen van 350 ton per jaar krijgen, hetgeen vergelijkbaar is met de capaciteit van de diffusiefabrieken in Capenhurst (Engeland) of Pierrelatte (Frankrijk), maar slechts 1% van die in de Verenigde Staten.

De internationale samenwerking wordt ten uitvoer gelegd door twee industriële ondernemingen. De verrijkingsorganisatie, URENCO Ltd., is in Marlow-on-Thames (Engeland) gevestigd. De andere internationale onderneming is CENTEC Gesellschaft für Centrifugentechnik mbH, die te Bensberg bij Keulen is gevestigd. De taak van CENTEC is het ontwerpen en bouwen van fabrieken voor uraniumverrijking volgens het ultracentrifugeprocédé.

In URENCO Ltd. nemen als gelijke partners deel: voor Nederland: Ultra-Centrifuge Nederland NV (UCN), voor Duitsland: Uranit GmbH, voor Engeland: British Nuclear Fuels Ltd. (BNFL). In CENTEC nemen voor Nederland en Engeland dezelfde partners deel, voor Duitsland is dit het Gesellschaft für Nukleare Verfahrenstechnik (GnV). Zowel URENCO als CENTEC hebben de opdracht hun taak uit te voeren met maximale gebruikmaking van de bestaande installaties.

In de tweede helft van 1969 werd in Almelo door UCN een aanvang gemaakt met de bouw van een verrijkingsfabriek met een capaciteit voor maximaal 25 ton scheidingsarbeid per jaar en een fabriek voor de produktie van de hiervoor benodigde centrifuges, alles naar Nederlands ontwerp. Daarnaast is - eveneens in Almelo - een verrijkingsfabriek, en eveneens voor 25 ton scheidingsarbeid per jaar, in aanbouw volgens Duits ontwerp. In Capenhurst in Engeland is een fabriek volgens Engels ontwerp in aanbouw met een totaal jaarlijks scheidend vermogen van max. 40 ton. Hierna zal de capaciteit worden uitgebreid tot het totaal van 350 ton per jaar. Na voltooiing van dit z.g. aanvangsprogramma zal de verrijkingsfabriek in Almelo tot optimale capaciteit, die op tenminste 600 ton per jaar wordt gesteld, worden uitgebreid.

Om een exploitatie op zuiver commerciële basis mogelijk te maken zal, naast de bouw van de proeffabrieken, nog onderzoek- en ontwikkelingswerk moeten worden verricht. CENTEC heeft in-

middels een begin gemaakt met het opstellen van een geïntegreerd onderzoek- en ontwikkelingsprogramma. Bij de uitvoering hiervan zal zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van de bestaande onderzoek- en proefinstallaties en -instanties in de drie landen. Voor Nederland moeten hierbij de installaties van het UC-laboratorium van het RCN te Amsterdam en van de NV Ultra-Centrifuge Nederland in Almelo worden genoemd, alsmede de capaciteit van TNO en VMF. Het is de bedoeling, mede door het combineren van daartoe geëigende elementen uit de in elk van de drie landen ontwikkelde typen centrifuges, zo spoedig mogelijk te komen tot het in produktie nemen van op economische schaal te exploiteren centrifuges van een gemeenschappelijk type.

Uiteraard moet veel aandacht besteed worden aan de internationale implicaties van een uraniumisotopen-scheidingsbedrijf. Om deze reden hebben de drie overheden een z.g. Joint Committee ingesteld. Dit is een uit regeringsvertegenwoordigers bestaand orgaan, dat met unanimité moet besluiten, en dat belast is met de behandeling van de politieke aspecten van de samenwerking. Het Committee houdt ten aanzien van het non-proliferatie-aspect toezicht op de faits et gestes van de beide internationale organisaties.

Het unieke van deze samenwerking is dat de drie regeringen een overeenkomst gesloten hebben die het mogelijk maakte een tweetal industriële ondernemingen op te richten, die op normale industriële basis werken. De regeringen houden zich uitsluitend bezig met de politieke aspecten van de samenwerking, niet met de technische en economische zijde ervan.

Een lange, moeizame weg

Uit deze beschrijving van de ontwikkeling van de ultracentrifuge in Nederland blijkt wel dat een lange en moeizame weg moest worden afgelegd voor de eerste centrifuges, in cascade geschakeld, konden draaien in de proeffabriek in Almelo. Alle betrokkenen hebben over een groot doorzettingsvermogen moeten beschikken om de ontwikkeling door te zetten, ondanks alle problemen - zowel technische als financiële - die zich steeds weer voordeden. Opmerkelijk is verder dat de discussie tussen Frankrijk en de andere landen of een grote Europese scheidingsfabriek moet werken op basis van de gasdiffusie of volgens het ultracentrifugeprocédé, een discussie die reeds sinds het midden van de jaren '50 gevoerd wordt, nog steeds niet beslecht is; al zijn er wel duidelijke aanwijzingen dat de gasdiffusie in Europa niet zal kunnen concurreren tegen de ultracentrifuge, die mede door Nederlandse onderzoekers werd ontwikkeld.

De Nederlandse proeffabriek voor het verrijken van natuurlijk uranium met behulp van ultracentrifuges

This article gives a description of the Dutch pilot plant for the fabrication of gas centrifuges, and of the construction of the enrichment plant. An impression of the equipment is given as well.

Inleiding

De bouw van kernenergiecentrales om te voorzien in de groeiende behoefte aan elektrische energie impliceert dat er voor gezorgd moet worden dat de splijtstof voor dergelijke installaties - in de eerstkomende tijd verrijkt uranium - in voldoende mate voorhanden is en blijft.

De mogelijkheden voor West-Europa om zelf in de toekomstige behoefte aan verrijkt uranium te voorzien, vormen reeds lange tijd een punt van studie. Het is alom bekend dat het gasdiffusieproces, dat in Amerika als produktiemethode voor het verrijken van uranium wordt toegepast, voor West-Europa zeer onaantrekkelijke facetten heeft. Zo vormt het zeer hoge specifieke energieverbruik van de gasdiffusiemethode in combinatie met de naar verhouding hoge Europese kWh-prijs een ernstige belemmering om in Europa tot de bouw van dergelijke verrijkingsinstallaties over te gaan. Berekeningen geven aan dat onder Europese omstandigheden installaties een capaciteit van tenminste 6000-9000 ton SWU (Separative Work Unit) per jaar zouden moeten hebben om rendabel te kunnen zijn. Aan de bouw van dergelijke grote eenheden, waarvan de produktie eerst kan aanvangen wanneer nagenoeg de gehele installatie is gereedgekomen, zijn grote financiële risico's verbonden waarvoor het huidige economische klimaat nauwelijks ruimte laat. Voorts is de onmogelijkheid om met gasdiffusie-installaties de groeiende behoefte aan verrijkt uranium stapsgewijs en dus op de voet te volgen een aspect dat niet buiten beschouwing gelaten kan worden wanneer beslist moet worden over een eventuele realisering van een verrijkingsinstallatie volgens het gasdiffusieprincipe. Dat toch met name in Frankrijk de ontwikkeling van gasdiffusie-installaties wordt voortgezet en de mogelijke bouw ervan in Europa aan vèrgaande finan-

ciële en economische studies wordt onderworpen, moet gezien worden als een logisch gevolg van de ervaringen die in Frankrijk in de loop der jaren met het gasdiffusieproces zijn opgedaan.

Dat in Europa en meer specifiek in Nederland, Duitsland en Engeland in de laatste tien jaar veel researchwerk is verricht om een uranium-verrijkmethode te ontwikkelen die beter zou aansluiten bij de Europese omstandigheden, mag dan ook niet verwonderlijk heten. De ultracentrifugemethode, waarbij de verrijkingswerking wordt verkregen door scheiding van uraniumisotopen in het centrifugaal veld dat ontstaat in een snel roterende trommel, gold vanwege haar in vergelijking met de gasdiffusiemethode laag specifiek energieverbruik (250 kWh/kg SWU t.o.v. 2500 à 5000 kWh/kg SWU) en haar hoge verrijkingsfactor (tot 1,2 per trap t.o.v. 1,002 per trap voor het diffusieproces) in deze als veelbelovend.

Aan de technologische ontwikkeling van ultracentrifuges is in Nederland met succes gewerkt door het Reactor Centrum Nederland en wel in het Ultra-Centrifuge Laboratorium van het RCN te Amsterdam.

Na vele jaren van onderzoek kwam in 1969 een ultracentrifugeontwerp gereed, dat na te zijn beproefd in diverse cascade-installaties van kleinere omvang, rijp was om ter betere afschatting van de technische en economische merites in een proeffabriek te worden opgenomen. Evenals in Nederland werd in Engeland en Duitsland ongeveer tezelfder tijd geconcludeerd dat de zogenaamde ultracentrifugemethode als produktieproces voor het verrijken van uranium zowel in technische als in economische zin reële mogelijkheden inhield.

Teneinde tot een hechte commerciële grondslag te komen bij de verdere ontwikkeling van de ultracentrifugemethode als uranium-verrijkingsproces,

werd op 4 maart 1970 te Almelo door de overheden van Nederland, Engeland en West-Duitsland een samenwerkingsovereenkomst ondertekend binnen welks kader tot oprichting van twee internationale organisaties werd overgegaan, t.w. Centec en Urenco.

Enige maanden eerder, op 11 november 1969, was in Nederland de officiële oprichting van Ultra-Centrifuge Nederland (UCN) een feit geworden. De nieuwe NV, waarin voor 57% de Nederlandse overheid participeert en voor het resterende gedeelte vijf Nederlandse industrieën (Philips, Shell, DSM, Rijn-Schelde en VMF), kreeg tot taak Nederland in de internationale organisaties te vertegenwoordigen.

UCN heeft sindsdien in nauwe samenwerking met het Ultra-Centrifuge Laboratorium zowel in nationaal als internationaal opzicht reeds veel werk verricht, waarvan de bouw van twee proeffabrieken op basis van nationale UC-kennis, de coördinatie van de internationale uitwisseling van centrifugegegevens en bijdrage in de studie gericht op de bouw van de eerste internationale verrijkingsinstallatie als voorbeeld mogen dienen.

Internationale afspraken

Met het sluiten van de tripartite overeenkomst te Almelo werd naast het vastleggen van de grondregels ter verdere evaluering van het ultracentrifuge procédé in tripartite verband, onder andere overeengekomen dat door elk der partners op basis van ieders nationale kennis een proeffabriek zou worden opgebouwd om de verworven technologische kennis op het gebied van uraniumverrijking op redelijke schaal aan de praktijk te kunnen toetsen.

Als bouwplaats voor de proeffabrieken, elk met een scheidingscapaciteit van 25 ton SWU per jaar, werd voor Engeland de plaats Capenhurst en voor Nederland en Duitsland de plaats Almelo gekozen. Het industriegebied te Almelo, dat is gereserveerd voor de bouw van uraniumverrijkingsfabrieken, staat bekend als het bestemmingsplan 'Drienemanslanden'. Op het betreffende grondgebied van ca. 45 ha zijn inmiddels drie fabrieken gebouwd. Figuur 1 geeft een overzicht van de ligging van de drie fabrieken en van de diverse hulpgebouwen. Een overzicht van de feitelijke situatie valt af te leiden uit een recente luchtopname van het complex, welke is afgebeeld in figuur 2.

Voor de Nederlandse scheidingsfabriek is inmiddels de fase van geleidelijke inbedrijfname ingegaan. De Duitse en Engelse partners daarentegen

zijn nog druk doende met de feitelijke opbouw van hun nationale proeffabrieken.

In het kader van dit artikel zal vooral aandacht besteed worden aan de opbouw van de Nederlandse uranium-verrijkingsinstallatie, waarbij tevens enig inzicht aangaande de produktiefaciliteit van ultracentrifuges naar Nederlands ontwerp gegeven zal worden.

Zoals reeds eerder is opgemerkt, behoort de realisatie van de nationale proeffabrieken tot de taak van Ultra-Centrifuge Nederland NV. Anticiperend op de internationale ontwikkelingen werd reeds geruime tijd voor de officiële oprichting van UCN onder leiding van prof. dr. M. Bogaardt, directeur van UCN NV, een aanvang gemaakt met de realisering van de produktiefaciliteit voor ultracentrifuges. Dat de voorbereidingen in een vroeg stadium zijn aangevangen, berustte enerzijds op het vertrouwen ten aanzien van het welslagen van het project, anderzijds op de wetenschap dat de fabricage van ultracentrifuges een even noodzakelijk als gecompliceerd gedeelte van de verrijkingsinstallatie zou vormen.

De UCN-centrifugefabriek

Voor de feitelijke vervaardiging van het benodigd contingent ultracentrifuges heeft UCN zich met het pakket ultracentrifugegegevens, zoals dat was ontworpen door het Ultra-Centrifuge Laboratorium te Amsterdam, in eerste instantie gericht tot de industriële organisatie VMF. Dit contact resulteerde al spoedig in de oprichting van de Philips/VMF-Fabrikage Combinatie, die de opdracht aanvaardde tot vervaardiging van de ultracentrifuges, benodigd voor de Nederlandse 25 tons uranium-verrijkingsinstallatie.

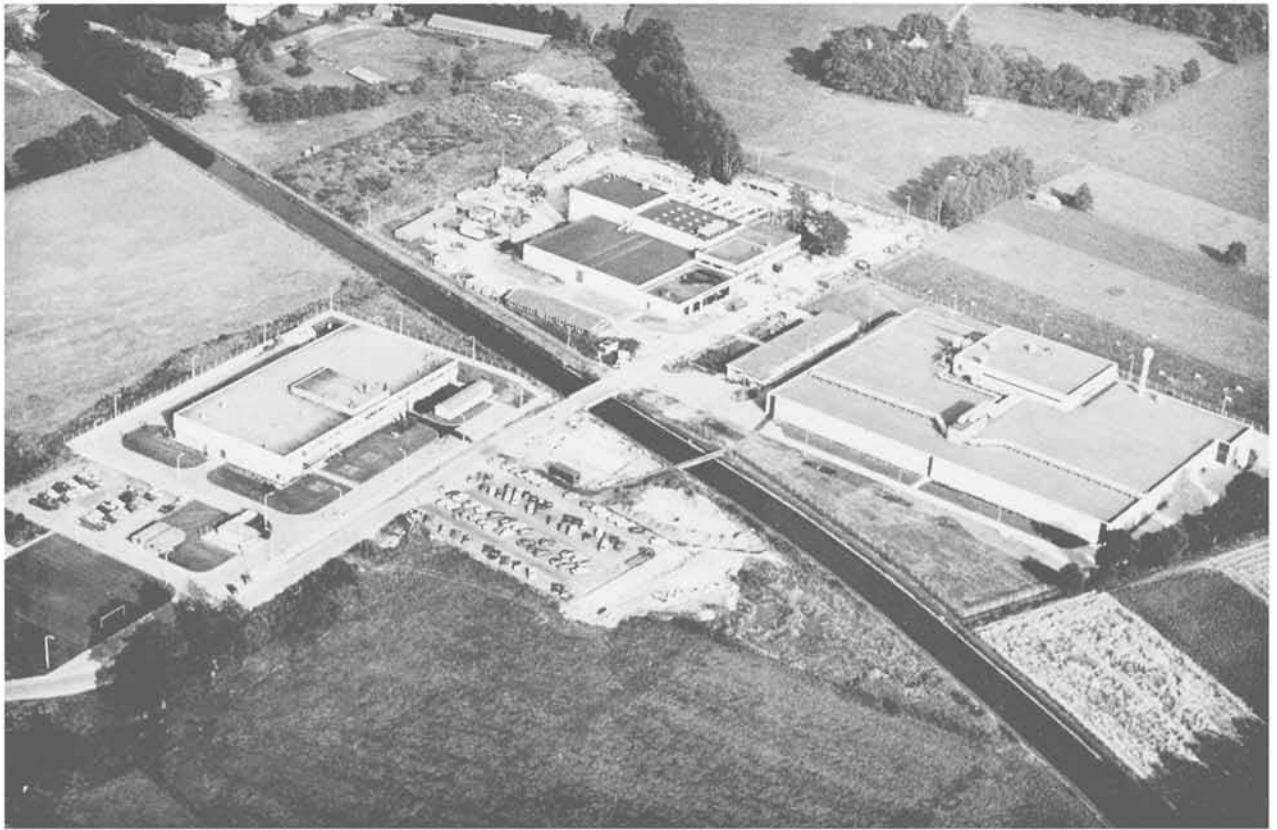
Met de realisering van de produktiefaciliteit, waarvan het civiele gedeelte door het architectenbureau Intarco werd verzorgd, kon in juli 1969 een begin worden gemaakt.

Reeds in het voorjaar van 1970 kon worden gestart met de inrichting van de fabriek.

In de fabriek, die een breedte van 45 m en een lengte van 75 m heeft, zijn globaal gezien vier gedeelten te onderscheiden:

- het magazijngedeelte,
- de werkplaats voor bijzonder mechanische bewerkingen,
- de UC-montagehal, en
- de kantoorruimten.

In het magazijn vindt naast de opslag van grondstoffen benodigd voor UC-onderdelen die in de eigen mechanische werkplaats worden vervaardigd, tevens opslag plaats van de UC-onderdelen, die van derden worden betrokken.



Figuur 2. Luchtopname van de te Almelo in aanbouw zijnde uraniumverrijkingsindustrie.

Wat betreft de inrichting van de mechanische werkplaats is er naar gestreefd deze zo klein mogelijk te houden. Het besluit om fabricage van bepaalde UC-onderdelen in eigen werkplaats te realiseren, werd alleen genomen als uitzonderlijke fabricage-technische problemen, of wel beveiligingsaspecten daarom vroegen.

Zoals de naam reeds aangeeft, vindt in het fabrieks-gedeelte dat wordt aangeduid met UC-montagehal, de samenvoeging plaats van de diverse onderdelen tot complete ultracentrifuges. Om zowel de vereiste productiesnelheid als de vereiste constantheid in kwaliteit te kunnen waarborgen, zijn diverse speciale montagetoestellen en hulpgereedschappen ontworpen en geïnstalleerd. Om maatafwijkingen tot een minimum te beperken, is zowel de mechanische werkplaats als de UC-montagehal uitgerust met een klimaatregeling.

Tijdens het gehele fabricageproces worden zowel de onderdelen als de submontages aan een strenge kwaliteitscontrole onderworpen. Bovendien worden

alle ultracentrifuges na volledige montage op een speciale testvoorziening aan een eindbeproeving onderworpen. De centrifuges die aan de gestelde kwaliteitseisen blijken te voldoen, worden vervolgens voor transport naar de scheidingsfabriek gereedgemaakt, waarmede het eindpunt van de UC-productielijn is bereikt.

Door Philips/VMF zijn thans ca. 110 man ingeschakeld om de gewenste UC-productie te realiseren. Daarnaast is onder leiding van UCN een productie-ontwikkelingsgroep werkzaam, teneinde de diverse productieproblemen tot een snelle oplossing te voeren. Tevens heeft de groep als schakel tussen het UC-laboratorium en de fabrikant zich toegelegd op het optimaliseren van de fabricagelijijn, waartoe veel experimenteel werk wordt verzet. Inmiddels wordt door de diverse groeperingen de fabricageproblematiek zo goed beheerst, dat een constante stroom van de ultracentrifuges aan de scheidingsfabriek kan worden aangeboden.

De UCN-Scheidingsfabriek

Vijf maanden na de aanvang van de bouw van de productiefaciliteit voor ultracentrifuges is de bouw gestart van de Nederlandse proefinstallatie van

uraniumverrijking, de zogeheten UCN-Scheidingsfabriek. De opdracht voor het ontwerpen en bouwen van de 25 tons proefinstallatie, uitgerust met ultracentrifuges van Nederlands ontwerp, heeft UCN kunnen plaatsen bij het Ingenieursbureau Comprimo BV te Amsterdam.

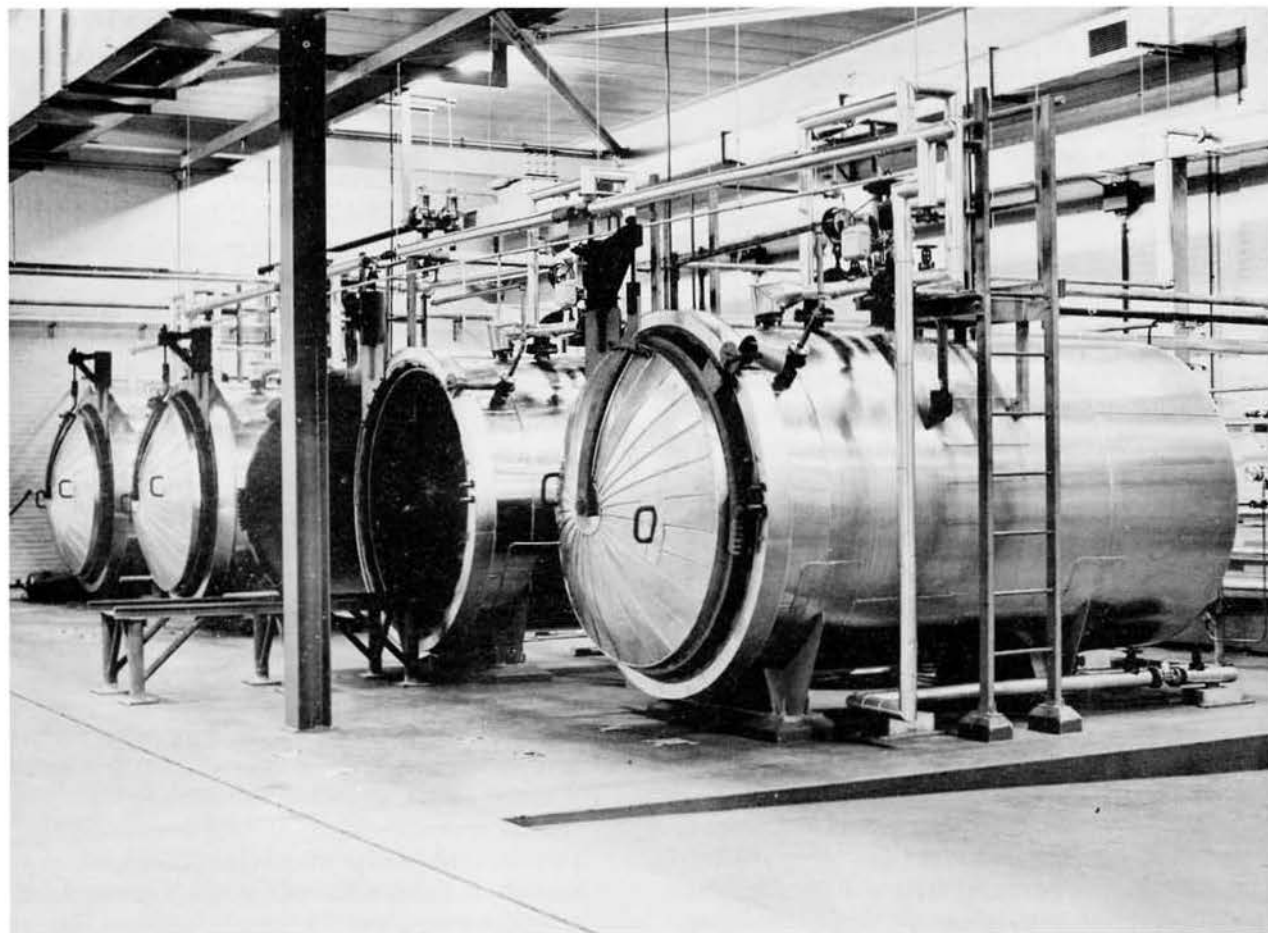
Tijdens de bouw van de proefinstallatie is duidelijk geworden hoe zeer Nederland met het ultracentrifugeprocédé zich op een zeer geavanceerd en onbekend terrein bewoog. Zowel tijdens de ontwerpwerkzaamheden als bij de feitelijke bouw van de proefinstallatie deed de onbekendheid met het nieuwe procédé zich meermalen gevoelen. Zo noopte nog simultaan aan de ontwerpactiviteiten lopend onderzoek in het UC-laboratorium somtijds tot ontwerpwijzigingen op het laatste moment. Ook de bouw van het zeer compacte systeem van pijpen waarop de duizenden centrifuges moesten worden aangesloten - het zogenaamde cascadepijpennet - verliep niet zonder moeilijkheden. Desondanks is

door bundeling van het ter beschikking staande potentieel, waarbij de Nederlandse industrie in ruime mate is ingeschakeld, een proeffabriek opgebouwd die in alle opzichten aan de verwachtingen beantwoordt.

De bouw van de proeffabriek, waarmede in november 1969 is gestart, werd civiel-technisch voltooid in het voorjaar van 1971. De fabriek met een oppervlakte van 80 x 100 m², bestaat uit twee gedeelten, t.w. een cascadehal van 50 x 100 m², alwaar volledig gescheiden van de overige fabrieksgedeelten alle centrifuges staan opgesteld, en een centraal gebouw van 30 x 100 m² dat ruimte biedt aan alle hulpsystemen nodig om het verrijkingsproces te kunnen realiseren. Het centraal gebouw is bovendien voorzien van een opbouw van waaruit het proces centraal bestuurd kan worden.

Met het opbouwen van de technische inrichting is ruim 1 jaar gemoeid geweest. Rond juni 1972 kon een begin worden gemaakt met het beproeven van de diverse systemen. De beproevingen verliepen

Figuur 3. De container-opwarmvaten van het UF₆-gasvoedingssysteem.



dusdanig voorspoedig dat reeds per 1 september 1972 de Nederlandse scheidingsfabriek als operationeel gereed beschouwd kon worden.

Algemene beschrijving van de technische inrichting

De beschrijving van de technische inrichting valt uiteen in de systemen opgesteld in het centraal gebouw en de systemen welke in de cascadehal zijn ondergebracht. Voor beide fabrieksgedeelten zijn zeer markante bouwtechnische problemen te noemen, die bij het monteren van de technische inrichting naar voren zijn gekomen.

In het verdere verloop van dit hoofdstuk zullen enkele van deze aspecten nader toegelicht worden.

Het centraal gebouw

In het centraal gebouw, dat met de lange zijde aan de cascadehal grenst, zijn alle hulpsystemen ondergebracht die nodig zijn om de fabriek operationeel te kunnen bedrijven.

Omdat ter doorvoering van het verrijkingsproces het natuurlijk uranium gebonden is aan fluor, zijn om zowel procestechnische als veiligheidstechnische redenen alle hulpsystemen, die met UF_6 -behandeling te maken hebben, in één ruimte van het centraal gebouw geconcentreerd.

In dit van een apart ventilatiesysteem voorziene gasbehandelingsgedeelte staan opgesteld:

- het gasvoedingssysteem,
- het gasinvriessysteem,
- het cascade-evacuatiesysteem,
- het afvalbehandelingssysteem.

Terwijl enerzijds met het gasvoedingssysteem de gasstroom UF_6 naar de cascade wordt gerealiseerd, maakt het gasinvriessysteem anderzijds de terugwinning van de verrijkte fractie (de produktstroom) en de verarmde fractie (de cascade-afvalstroom) mogelijk die aan de top resp. de bodem van de cascade na passage van alle ultracentrifuges de cascade verlaten.

Het gasvoedingssysteem, waarvan figuur 3 een goede indruk geeft, bestaat uit een viertal drukvaten waarin containers, gevuld met bij kamertemperatuur vast UF_6 , geplaatst kunnen worden om te worden opgewarmd totdat de inhoud ervan vloeibaar is. De opwarming van een container geschiedt met behulp van hete lucht die in de opwarm-tank gecirculeerd wordt. Voor het instellen van de gewenste UF_6 -gasstroom van een container naar de cascade is een regelsysteem van kleppen ontworpen, waarmee tevens de vereiste reductie in UF_6 -gasdruk tot stand wordt gebracht.

De terugwinning van de produkt- en de cascade-afvalstroom geschiedt met behulp van apparaten waarin het gasvormige UF_6 kan worden ingevroren (desublimers), waarvan in totaal negen stuks staan opgesteld (zie figuur 4). De koelpijpen van de desublimers, waarmee produkt of afval wordt opgevangen, worden met behulp van freon op zo'n lage temperatuur gehouden dat het toestromende UF_6 -gas op de koude wand ervan uitvriest. Zodra een gelimiteerde hoeveelheid UF_6 -gas is uitgevroren, wordt overgeschakeld op een 'stand-by'-desublimer, waarna het invriesproces voortgang kan vinden.

De ingevroren hoeveelheid UF_6 in een desublimer kan vloeibaar worden gemaakt door via een apart warm freon circuit warmte toe te voeren. Eenmaal geheel vloeibaar wordt de desbetreffende hoeveelheid UF_6 gedumpt in een container die daartoe vacuumdicht op de desublimer in kwestie aangesloten wordt. Na afkoeling van de inhoud, waarbij het UF_6 weer in de vaste fase terugkeert, vindt verder vervoer naar de UF_6 -opslagruimte plaats.

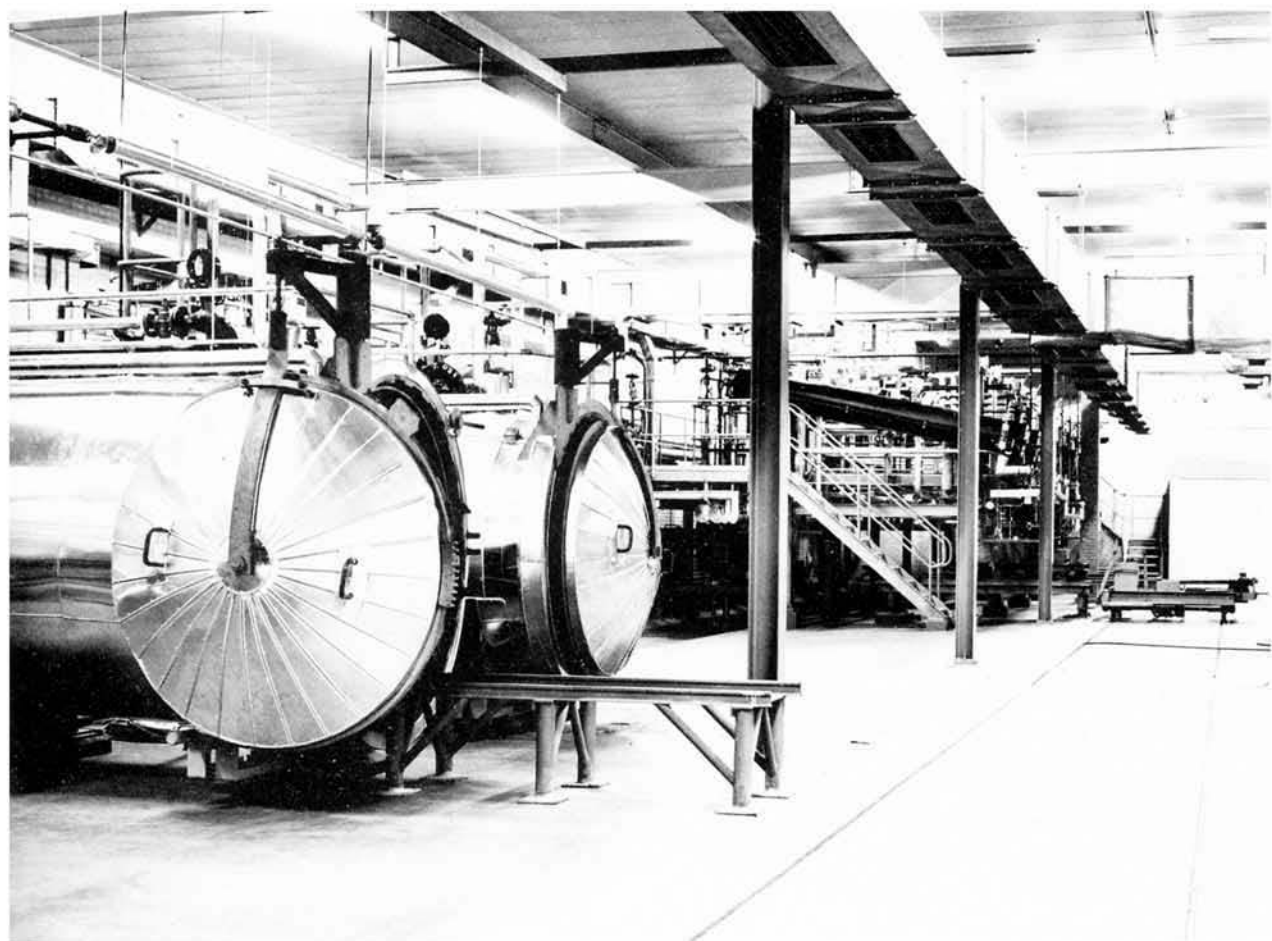
Het ontwerpen van de gasbehandelingssystemen was geen eenvoudige aangelegenheid omdat niet gesteund kon worden op reeds aanwezige ervaring met betrekking tot de constructie van de beschreven UF_6 -systemen. Bij de warmteberekeningen werd een extra moeilijkheid ondervonden door het gebrek aan voldoende nauwkeurige gegevens voor de UF_6 -stofconstanten. Op basis van een aantal op kleinere schaal uitgevoerde experimenten zijn desondanks de benodigde UF_6 -systemen gerealiseerd die thans in de praktijk bewijzen aan alle gestelde eisen te voldoen.

Binnen het zogenaamde UF_6 -gedeelte van het centraal gebouw is voorts een ruimte ingericht voor de diverse vacuumpompen van het cascade-evacuatiesysteem, waarvan figuur 5 een beeld geeft. Dit systeem vervult binnen het verrijkingsproces diverse functies waarvan de belangrijkste zijn:

- het evacueren van de cascade alvorens ultracentrifuges op toeren te brengen,
- het handhaven van de onderdruk tijdens UF_6 -bedrijf, en
- het handhaven van voldoende onderdruk in de cascade tijdens overmatige luchtinlek.

Teneinde ongecontroleerd ontsnappen van UF_6 te voorkomen zijn in de leidingen tussen de vacuumpompen en de cascade koelvallen van vloeibare stikstof opgenomen.

De installatie van het afvalbehandelingssysteem berust op de veiligheidsbepaling dat in geval ruimten gecontamineerd worden met UF_6 als gevolg van onvoorziene bedrijfsomstandigheden, deze zonder



Figuur 4. De UF_6 -gasvoedingsruimte met op de achtergrond de desublimerinstallatie voor terugwinning van de verrijkte en verarmde UF_6 -gasstromen.

gevaar voor het bedrijfspersoneel en de omgeving weer toegankelijk gemaakt kunnen worden.

Van de niet- UF_6 -systemen die elders in het centraal gebouw zijn ondergebracht, kunnen zonder verder op details in te gaan als belangrijkste systemen worden genoemd:

- de elektrische krachstroomverdeling met daarin opgenomen de frequentie-omvormers,
- het warme- en koude freon systeem t.b.v. de desublimers,
- het cascadekoelwatersysteem ter koeling van de UC's,
- het cascadeventilatiesysteem, en
- het instrumentenluchtsysteem.

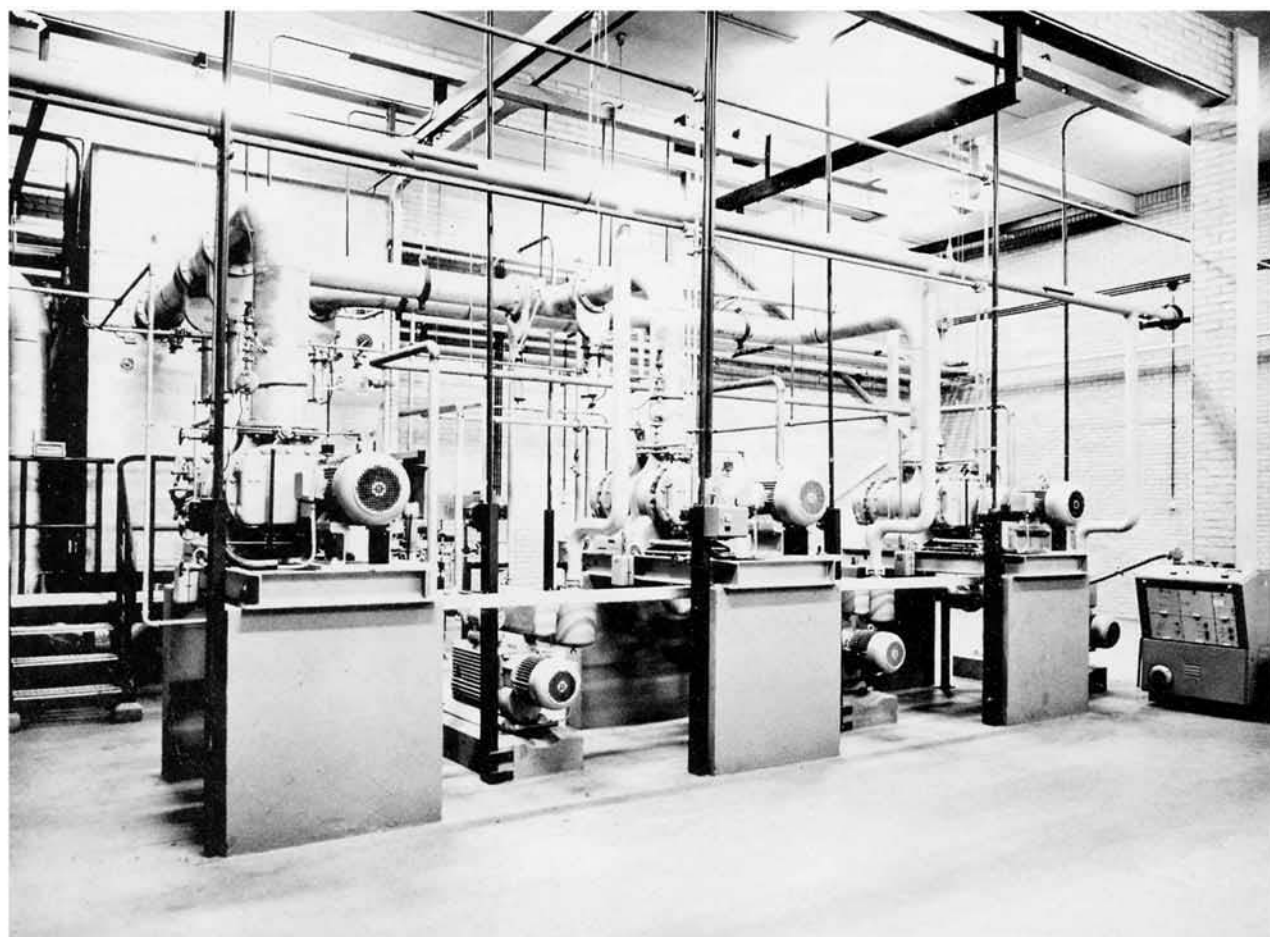
In het fabrieksgedeelte dat wordt aangeduid als de centrale opbouw zijn ten slotte de besturings- en controle-organen van het verrijkingsproces opge-

nomen. De belangrijkste elementen die er zijn ondergebracht zijn het centrale bedieningspaneel ter sturing en beoordeling van de feitelijke processituatie, het computersysteem ter automatische beveiliging van het proces bij opstarten en bedrijfsstoringen, en de massaspectrometers ter bepaling van de ^{235}U -concentratie van de onderscheiden gasstromen. In figuur 6 is de apparatuur te zien waarmee deze metingen worden verricht.

De cascadehal

De technische inrichting van de cascadehal is totaal verschillend van die in het centraal gebouw. Terwijl in het centraal gebouw hoofdzakelijk systemen zijn opgebouwd die voor een groot deel uit standaard-elementen konden worden samengesteld, moest in de cascadehal een systeem gerealiseerd worden dat wegens zijn vacuüm-technische eisen en omvang een aparte benadering vereiste.

Bij de technische inrichting van de cascadehal zijn, afgezien van steeds zeer wijd vertakte procesvoorzieningen (elektrische voeding, koelwater, instru-



Figuur 5. Vacuumpompen van het cascade-evacuatie-systeem met op de achtergrond de N_2 -koelval voor het invriezen van aangezogen UF_6 .

mentatie), twee belangrijke delen te onderscheiden, t.w.:

- het cascade pijpennet, en
- de ultracentrifuges met hun fundering.

Het cascade pijpennet

Teneinde het gewenste verrijkingsproces met ultracentrifuges te kunnen realiseren is het noodzakelijk dat groepen parallel geschakelde centrifuges zijn opgenomen in een zogenaamde cascadeschakeling.

Voor een cascadeschakeling geldt dat parallel geschakelde centrifuges verenigd in een zogeheten 'trap' gevoed worden met een gasstroom die is samengesteld uit de verarmde gasstroom van de bovenliggende trap en de verrijkte gasstroom van de onderliggende trap. Gelet op het grote aantal benodigde ultracentrifuges en de onderlinge scha-

keling mag het niet verwonderlijk heten dat het cascadepijpennet een complex, vele kilometers lang pijpsysteem is.

Aan het cascadepijpennet zijn hoge eisen opgelegd ten aanzien van de lektheid en de flexibiliteit van de verbinding met de ultracentrifuges. De strenge eisen zijn gesteld om maximale veiligheid te garanderen ten aanzien van de werking van de ultracentrifuges zelf. Ondanks de stringentheid van de eisen kon daaraan, zij het met veel technische inspanning, worden voldaan. Om aan de hoge lektheidseis te kunnen voldoen, werd besloten alle te maken verbindingen in het cascadepijpennet uit te voeren als een lasverbinding, met uitzondering van de verbindingen met de centrifuges zelf.

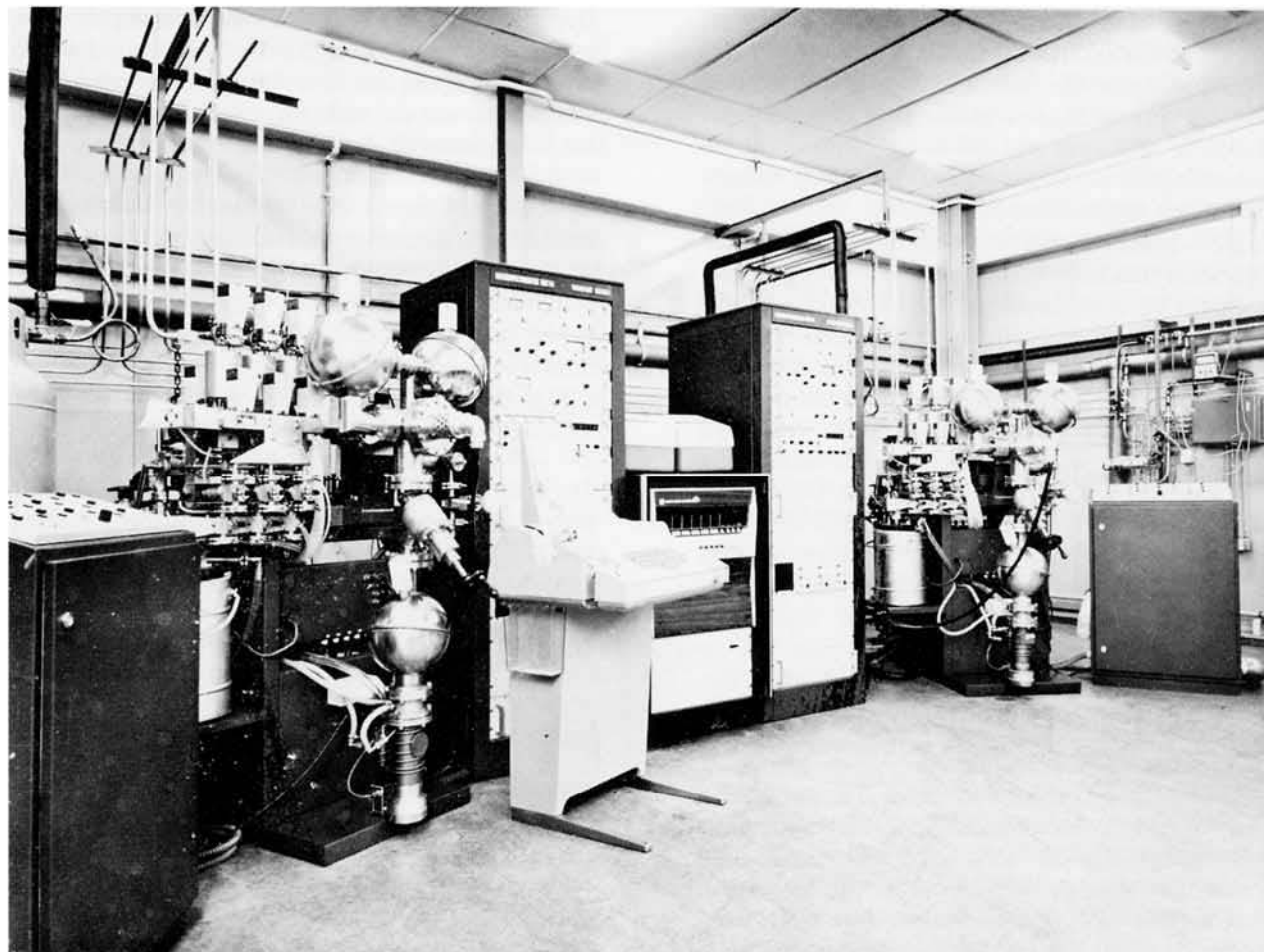
Hoewel een vooronderzoek op proefmateriaal deed vermoeden dat geen lasproblemen zouden optreden bij het verwerken van de aluminiumsoort die om corrosie-technische redenen als constructiemateriaal was gekozen, bleek het materiaal van de hoofdlevering om voorsnag onbekende redenen

dundanig in kwaliteit van het proefmateriaal te verschillen dat na maanden van onderzoek op een geheel andere lasmethode dan voorzien moest worden overgeschakeld. In dit verband is door de Rijn-Schelde NV te Vlissingen, die de opdracht tot realisering van het cascadepijpenet had aanvaard, veel werk verzet.

Van de vele kilometers pijp is een groot deel door Rijn-Schelde te Vlissingen geprefabriceerd in een speciaal daarvoor gebouwde hal. De bouw van de hal bleek noodzakelijk om de voorgeschreven zogenaamde 'clean room conditions' te kunnen handhaven, een voorschrift dat op zich weer samenhang met de zeer hoge eisen van lekdichtheid die aan de lassen afzonderlijk gesteld moesten worden. Na vervoer van de geprefabriceerde pijpsystemen naar de bouwplaats te Almelo zijn de delen door middel van montagelassen met elkaar verbonden. Ondanks

grote zorg die bij de opbouw van het cascadestelsel besteed is aan het voorkomen van verontreiniging als gevolg van fabricage- en montageactiviteiten, werd geen 100% resultaat geboekt. Het bleek noodzakelijk na gereedkomen een algehele reiniging van het systeem door te voeren omdat achtergebleven vuildeeltjes de zittingen van de afsluiters in het systeem zodanig beschadigden dat ontoelaatbare lekken over de zittingen ontstonden. Om voor het pijpsysteem de vereiste lekdichtheidsgraad te bereiken, zijn alle gelegde lassen zonder uitzondering met behulp van helium op lekdichtheid beproefd. Vanwege het grote aantal lassen in het systeem moest aan elke las afzonderlijk een strenge lekdichtheidseis opgelegd worden, hetgeen vanzelfsprekend tot de nodige reparaties van niet-vacuum-dichte lassen heeft geleid. Hoewel de controle op lekdichtheid van de montagelassen door middel van helium vaak een moeizaam en tijdrovend karwei was, is uiteindelijk een pijpsysteem verkregen dat met een totale inlek van klei-

Figuur 6 De massaspectrometeropstelling voor meting van concentraties ^{235}U in de gasvoedings-, produkt- en waste-stroom.



ner dan 15×10^{-3} Torr 1. per seconde aan vacu-eisen voldoet waarmee geen enkele afbreuk gedaan wordt aan de goede werking van de in het systeem opgenomen ultracentrifuges.

De ultracentrifuges

In technisch opzicht nemen de ultracentrifuges als deel van de verrijkingsfabriek een zeer aparte plaats in, omdat voor deze componenten zeer specifieke en strenge eisen zijn gedefinieerd waaraan bij vervoer, montage en tijdens bedrijf onverkort moet worden voldaan. Met betrekking tot het vervoer van UC's is bepaald dat bij transport de maximaal toelaatbaar geachte versnelling van $2,5 \text{ m/sec}^2$ niet mag worden overschreden.

In verband hiermede wordt voor het vervoer van UC's over de asfaltbaan tussen de centrifugefabriek en de scheidingsfabriek gebruik gemaakt van een heftruck die binnen de gestelde versnellingslimiet geprogrammeerd zowel in beweging gesteld als gestopt kan worden. Verder wordt een groep te vervoeren UC's in een zodanige hangconstructie opgepakt dat de bewegingen van de heftruck in slechts geringe versnellingen van de last resulteren. Metingen hebben uitgewezen dat de UC's met de genomen voorzorgen tijdens transport slechts versnellingen ondervinden die kleiner zijn dan 1 m/sec^2 . Alle handelingen die met UC's moeten worden verricht om vervoer naar en montage in de scheidingsfabriek te realiseren zijn om overschrijding van de versnellingslimiet te vermijden éénduidig vastgelegd in een methodekwalificatie.

Aan het funderen van ultracentrifuges is eveneens bijzondere aandacht besteed omdat de hoog-toerige machines bij in ongerede geraken zeer hoge krachten op de fundering kunnen uitoefenen. Daarbij gevoegd dat pijpbreuk in de verbindingsleidingen tussen UC's en cascade een luchtinbraak zou oproepen waardoor grote aantallen UC's vernietigd zouden kunnen worden, zal duidelijk maken dat naar een zeer solide fundering van de UC's is gestreefd. Als uiteindelijke oplossing is gekozen voor opstortingen van zwaar bewapend beton waarop groepen centrifuges met behulp van van veerpakketten voorziene bouten individueel afgesteund worden. De veerpakketten onder de voet van de centrifuges maken het mogelijk na bevestiging van de UC's op de fundering de centrifuges op eenvoudige wijze binnen de strenge verticaliteitslimiet af te stellen.

Na plaatsing op de fundering moet voor elke ultracentrifuge afzonderlijk de flensverbinding tussen UC en cascade tot stand worden gebracht. Vanwege de gestelde vacuum-technische eisen en de agressiviteit van het procesmedium is een speciale

flensverbinding ontworpen waarbij gebruik wordt gemaakt van de combinatie van metallieke afdichtingsringen en een afdichtingsring van kunststof.

De internationale organisatie

In de voorgaande hoofdstukken zijn hoofdzakelijk activiteiten belicht die de afgelopen jaren binnen het kader van de ontwikkeling van het ultracentrifugeprocédé door diverse Nederlandse instanties zijn verricht. Vanzelfsprekend zijn ook internationaal gezien reeds vele activiteiten ontplooid.

Op grond van de te Almelo gesloten tripartite overeenkomst tussen Engeland, Nederland en Duitsland, zijn in dit verband elk met een eigen specifieke taak twee internationale organisaties werkzaam, nl. Centec en Urenco.

Centec (met het hoofdkantoor te Bensberg nabij Keulen) is de internationale onderneming die met als basis de UC-kennis van de drie samenwerkende landen de verdere activiteiten aangaande research en ontwikkelingswerk stuurt, met als doel te komen tot het ontwerpen, het bouwen en in bedrijf stellen van economisch functionerende verrijkingseenheden.

Als tegenhanger vindt Centec de onderneming Urenco tegenover zich - een onderneming die, gevestigd te Marlow nabij Londen, zich voorbereidt op het bedrijven van verrijkingseenheden en het verzorgen van de verkoop van het produkt. In beide organisaties participeren Nederland, Duitsland en Engeland ieder voor $\frac{1}{3}$ deel.

Op basis van ingebrachte nationale kennis van de aangesloten landen is door Centec en Urenco een studie gemaakt van de internationaal te ontplooiën activiteiten. Het inmiddels opgestelde en ter discussie staande werkprogramma bevat zowel schema's voor verdere ontwikkeling van het ultracentrifugeconcept als schema's voor de bouw van grote scheidingseenheden. Wat betreft de bouw van nieuwe verrijkingsfabrieken wordt ernaar gestreefd in 1976 de eerste 300 tons verrijkingsinstallatie in bedrijf te nemen. Als bouwplaatsen voor uraniumverrijkingsfabrieken staan de internationale organisatie momenteel Almelo en Capenhurst ter beschikking.

Uitgangspunt bij de verwezenlijking van de diverse werkprogramma's vormt de evenredige inschakeling van de tripartite landen.

Gezien het zeer ambitieuze karakter van de werkprogramma's zal in zeer korte tijd bijzonder veel werk verzet moeten worden, een taak waar Nederland zich met de aanwezige kennis goed van zal kunnen kwijten als de Nederlandse belangengroeperingen harmonisch met elkaar zullen blijven samenwerken.

Het ultracentrifugeproject en de spreiding van kernwapens

In de publieke discussie over het ultracentrifuge (UC)-project heeft de mogelijke betekenis daarvan voor de energievoorziening op langere termijn van West-Europa veel minder aandacht gekregen dan de vraag van een mogelijk misbruik voor militaire doeleinden. Kortweg gezegd: zal de op deze wijze tot stand komende produktie van verrijkt uranium niet worden gebruikt voor de aanmaak van kernwapens? Draagt Nederland daartoe niet bij door met het Verenigd Koninkrijk en de Bondsrepubliek in dit project samen te werken en de vestiging van een verrijkingsfabriek in Almelo toe te staan?

Eén constatering dient dunkt mij voorop te staan: zou Nederland niet hebben meegedaan, dan zou het UC-project niet van de baan zijn geweest, maar dan zou het in het kader van een bilaterale Brits-Duitse samenwerking toch tot stand zijn gekomen. Dat geeft een zekere kracht aan het argument van de Nederlandse regering dat het uit een oogpunt van een effectief vredesbeleid doeltreffender was indien Nederland niet passief terzijde zou blijven staan, maar, gebruik makend van de mogelijkheden die het als partner deelnemen aan het project bood, actief diende te proberen zo waterdicht mogelijke garanties te verkrijgen dat misbruik voor militaire doeleinden zou zijn uitgesloten.

Is de regering in deze opzet geslaagd? De Memorie van Toelichting op het wetsontwerp tot goedkeuring van de Brits-Duits-Nederlandse UC-overeenkomst (zitting 1969/1970, no. 10733) beantwoordt deze vraag uitdrukkelijk bevestigend. Zo betoogt de regering: 'In artikel VI(1) worden in wezen de verplichtingen, welke voor de verdragsluitende partijen uit het non-proliferatieverdrag voortvloeien, herhaald. In artikel VI(2) verbinden de regeringen zich voorts te verzekeren dat de op te richten gezamenlijke ondernemingen geen uranium van de voor wapens vereiste verrijkingsgraad zullen produceren voor de vervaardiging van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen. De verificatie van de nakoming van deze verplichtingen door de Verdragsluitende Partijen wordt ingevolge artikel VII door middel van internationale controlemaatregelen verzekerd.'

Dit regeringsstandpunt werd echter in de Staten-Generaal bepaald niet algemeen gedeeld. De vrees

werd geuit dat het UC-project de Bondsrepubliek de mogelijkheid zou bieden zich een atoommacht aan te meten. Dit lijkt me echter een zeer aanvechtbare opvatting. Dat onze Oosterburen technologisch en financieel in staat zouden zijn om een atoomstrijdmacht op te bouwen, zo zij dat zouden willen, lijkt wel zeker. Dat kunnen zij ook wel zonder UC-project. Maar laten we niet vergeten dat zij zich in het kader van de akkoorden van Parijs van 1954, die de Duitse toetreding tot de NATO regelden, jegens hun partners in WEU en NATO verbonden hebben om niet tot de produktie van A.B.C.-wapens over te gaan, en dat bovendien alle installaties op het gebied van de kernenergie in de Bondsrepubliek onderworpen zijn aan het Euratom-controlesysteem dat erop toeziet dat uitsluitend van vreedzaam gebruik sprake zal zijn. Indien de Bondsrepubliek onder Willy Brandt, ondanks te verwachten oppositie van CDU/CSU, het non-proliferatieverdrag gaat ratificeren, zal daarmee tevens een nieuwe waarborg zijn geschapen dat West-Duitsland zich van het opbouwen van een eigen atoommacht zal onthouden. In deze situatie zou in de voorzienbare toekomst alleen verandering kunnen ontstaan, indien de NATO uiteen zou vallen. Daarin zou een toekomstige Bondsregering wellicht een reden kunnen zien om zich aan de jegens de Westelijke partners in 1954 aangegane verplichtingen ontslagen te achten en zich aan het non-proliferatieverdrag te onttrekken. In de huidige internationaal-politieke constellatie lijkt het echter nauwelijks denkbaar dat de Bondsrepubliek tot de opbouw van een eigen atoommacht zou overgaan. In elk geval blijkt uit de UC-overeenkomst dat de in het kader van het project op te richten tripartite installaties onder controle komen te staan van Euratom, een controle dus die ten doel heeft misbruik voor militaire doeleinden te voorkomen.

Blijkens de overeenkomst (art. VI(2)) zal in de gezamenlijke industriële ondernemingen geen uranium van de voor wapens vereiste verrijkingsgraad worden geproduceerd voor de vervaardiging van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen. Dit sluit niet uit, zoals de regering in haar Memorie van Antwoord aan de Tweede Kamer toegaf, dat Engeland verrijkt uranium, afkomstig uit een tri-

partite installatie, eventueel in eigen installaties zou kunnen verrijken tot een graad vereist voor de fabricage van kernwapens. Wel heeft de Britse regering zich bereid verklaard om, indien zij zou besluiten daartoe over te gaan, geen gebruik te maken van materiaal uit de verrijkingsfabriek in Almelo, maar uitsluitend uit die van Capenhurst. Geen verrijking dus tot de graad vereist voor de fabricage van kernwapens in de tripartite installaties in Almelo of Capenhurst, maar wel de mogelijkheid dat verrijkt uranium uit Capenhurst in een andere Britse installatie verder zal worden verrijkt om voor kernwapenproductie te kunnen worden gebruikt. Men zou dus staande kunnen houden dat, indien het UC-project een succes blijkt, voor Engeland, zij het op indirecte wijze, een mogelijkheid wordt geopend om goedkoper de status van militaire nucleaire macht te handhaven. En hiermee is tevens een nieuw punt van kritiek op het UC-project aangeduid. Maar is op deze wijze het probleem adequaat geschetst? In de eerste plaats dient men dunkt me in het oog te houden dat, hoezeer men dit ook kan betreuren, het non-proliferatieverdrag bestaande kernwapenstaten, zoals Groot-Brittannië, niet verbiedt hun atoommachten te handhaven. Maar bovenal mag men niet vergeten dat het al of niet voortbestaan van de Britse atoommacht vermoedelijk nauwelijks wordt beïnvloed door het al of niet ter beschikking komen van goedkoper verrijkt uranium via Capenhurst. Aan het voor kernwapenproductie vereiste verrijkt uranium kunnen de Britten zo zij dat willen toch wel komen, of er een UC-project is of niet. De mogelijkheden voor Engeland om zich te handhaven als kernwapenstaat worden veeleer beïnvloed door heel andere factoren, en wel met name de mogelijkheden om totale veroudering van het kernwapenarsenaal te voorkomen door hetzij de Amerikanen te bewegen tot leverantie van nieuwe generaties raketten over te gaan, hetzij zware financiële offers te brengen door het opbouwen van een eigen, uiterst kostbare, rakettechnologie. Het lijkt me dus wat ver gezocht om te stellen dat Nederland via het UC-project eraan meewerkt de Britse atoommacht in stand te houden.

Leveranties aan derde staten

Tot dusver besprak ik uitsluitend de vraag in hoeverre het UC-project ertoe zou kunnen bijdragen dat de Bondsrepubliek tot kernwapenstaat zou kunnen worden en het Verenigd Koninkrijk zich als kernwapenstaat zou kunnen handhaven. Maar uiteraard heeft het UC-project ook potentiële consequenties buiten de kring van de in het project samenwerkende landen. Met name denk ik daarbij aan de export van gegevens, uitrusting en materiaal aan derde landen die wellicht zouden kunnen pro-

beren met behulp daarvan een eigen atoommacht op te bouwen. De regering merkte in haar Memorie van Toelichting geruststellend op dat in artikel VI(I) van het verdrag in wezen alle verplichtingen van het non-proliferatieverdrag werden herhaald. Voor een belangrijk deel is dit inderdaad het geval. In artikel VI(I) leggen de verdragspartijen zichzelf een aantal gedragsregels op waarvan de betekenis niet mag worden onderschat.¹⁾ Maar toch was er één belangrijk verschil. Artikel III(2) van het non-proliferatieverdrag bevat een uitdrukkelijk verbod tot levering van gegevens, uitrusting, basis-materialen en bijzondere splijtbare materialen²⁾ aan staten die geen overeenkomst met het International Atomic Energy Agency (IAEA) in Wenen inzake de controle op het vreedzaam gebruik van kernenergie op hun grondgebied hebben afgesloten. Maar in art VI(I) van het UC-verdrag is een dergelijke bepaling niet te vinden.

In haar Memorie van Antwoord aan de Tweede Kamer heeft de regering dit erkend. 'Dat een uitdrukkelijk verbod als hierboven bedoeld in de overeenkomst niet is opgenomen', zo schreef zij, 'is het gevolg van bezwaren daartegen van Britse zijde. Ten tijde dat de eindredactie van de UC-overeenkomst werd opgesteld was het Verenigd Koninkrijk namelijk nog gebonden aan een aantal bilaterale overeenkomsten met derde landen, dat in de levering van materiaal enz. aan die landen voorzag, zonder dat in deze overeenkomsten de eis werd gesteld dat ontvangende staten IAEA-controle op de Britse leveranties zouden aanvaarden'.

De regering verklaarde overigens niet zo zwaar aan deze zaak te tillen. Zij voerde aan dat voor Groot-

1) 'De overeenkomstsluitende partijen verbinden zich gezamenlijk en ieder voor zich te verzekeren dat gegevens, uitrusting, basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen, in hun bezit ten behoeve van of als gevolg van de in Artikel I van deze overeenkomst omschreven samenwerking, niet zullen worden gebruikt door een niet-kernwapenstaat om kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen te vervaardigen of anderszins te verwerven of de beschikkingsmacht over zodanige kernwapens of nucleaire explosiemiddelen te verkrijgen, dan wel om een niet-kernwapenstaat te helpen, aan te moedigen of ertoe te bewegen kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen te vervaardigen of anderszins te verwerven of de beschikkingsmacht over zodanige kernwapens of nucleaire explosiemiddelen te verkrijgen. Voor de toepassing van dit lid betekent de uitdrukking 'niet-kernwapenstaat' een Staat, daaronder begrepen elke door deze Overeenkomst gebonden staat, die voor 1 januari 1967 geen kernwapen of ander nucleair explosiemiddel heeft vervaardigd en tot ontploffing heeft gebracht' (Tractatenblad 1970, no. 41).

2) Plutonium-239, uranium-233, uranium verrijkt in de isotopen 233 en 235 en elk materiaal dat een of meerdere van deze nucliden bevat.

Britannië inmiddels het non-proliferatieverdrag van kracht was geworden, hetgeen de Britse regering verplichtte de bestaande verdragen zonnig aan het non-proliferatieverdrag aan te passen. En tegen de tijd dat de produktie van verrijkt uranium op gang zou zijn gekomen, zouden de Bondsrepubliek en Nederland het non-proliferatieverdrag ook wel hebben geratificeerd. De regering beloofde bovendien dat in de krachtens de overeenkomst in te stellen tripartite z.g. Gemengde Commissie, die o.m. met unanimiteit van stemmen, over de uitvoer naar derde landen of ter beschikking stellen van derde landen van materialen, apparatuur, informatie en gegevens zou hebben te beslissen, Nederland steeds zou vast houden aan de eis dat geen export naar andere staten dan de lid-staten zou mogen plaats vinden, indien het ontvangende land ten aanzien van het vreedzaam gebruik niet de waarborgen, genoemd in het non-proliferatieverdrag zou aanvaarden.

Bij de mondelinge behandeling van het wetsontwerp inzake de goedkeuring van de UC-overeenkomst in de Tweede Kamer ¹⁾ heb ik op dit punt bezwaren gemaakt. In de eerste plaats heb ik erop gewezen dat, gezien de afwijzende houding van de CDU/CSU t.a.v. dit verdrag, bepaald geen zekerheid bestond dat het non-proliferatieverdrag door de Duitse Bondsdag zou worden geratificeerd (dat de SPD in november 1972 een zo overtuigende verkiezingsoverwinning zou behalen, kon ik uiteraard in maart 1971 nog niet voorzien). En bovendien achtte ik de toezegging van de regering in de Gemengde Commissie steeds aan de eis van de waarborgen voor vreedzaam gebruik van het non-proliferatieverdrag vast te houden, ontoereikend, omdat uiteraard het zittende kabinet niet bij machte was een volgend kabinet te verplichten een zelfde gedragslijn te volgen. De enige afdoende maatregel leek mij een aanvulling van het verdrag in de door mij bepleite zin. Met dit doel voor ogen diende ik een motie van die strekking in, die, nadat in het overleg met de regering en de andere fracties daarin nog enige wijzigingen waren aangebracht, ten slotte werd aangenomen.

Minister Luns bleek bereid aan deze motie uitvoering te geven, zij het dan dat hij niet een formele wijziging van het verdrag wenste, maar aan een briefwisseling ter aanvulling van het verdrag de voorkeur gaf. Aangezien een dergelijke briefwisseling geacht wordt deel uit te maken van een overeenkomst en dezelfde bindende kracht heeft als de overeenkomst zelve, heb ik op dit punt geen bezwaren gemaakt. Het doel was bereikt: een leverantieverbod voor niet-kernwapenstaten die zich

niet bereid zouden verklaren IAEA-controle inzake vreedzaam gebruik op hun grondgebied te aanvaarden.

Was hiermee een volledig effectief samenstel van waarborgen bereikt? Ook toen het mogelijk bleek het in art III(2) van het non-proliferatieverdrag vastgelegde leverantieverbod voor staten die geen IAEA-controle accepteren in de UC-overeenkomst 'in te bouwen', bleef nog een probleem bestaan. Het non-proliferatieverdrag verplicht alleen tot IAEA-controle in niet-kernwapenstaten. M.a.w.: onopgelost bleef de kwestie van UC-leveranties aan de kernwapenstaat Frankrijk. Minister Luns tilde daar niet zwaar aan en merkte op 'dat de drie verdragsluitende partijen uiteraard leveranties aan Frankrijk gepaard zullen doen gaan van de voorwaarde, dat zij niet ten doel hebben het gebruik voor de fabricage van kernwapens. Hierop rust dan automatisch de controle van Euratom'. Mijnerzijds heb ik er echter op gewezen dat Frankrijk ook zou kunnen besluiten om uit de tripartite UC-ondernemingen betrokken materialen aan derde landen door te leveren, zonder de in het non-proliferatieverdrag geëiste waarborg van IAEA-controle op vreedzaam gebruik te verlangen. Frankrijk weigert immers tot het non-proliferatieverdrag toe te treden en behoeft zich diensgevolge niet verplicht te achten in haar relaties met andere landen de bepalingen van dit verdrag in het oog te houden.

Het debat tussen de minister, het toenmalige Kamerlid Westerterp en mijzelf heeft ten slotte tot de toezegging van de minister geleid dat in geen geval de Nederlandse vertegenwoordiger in de Gemengde Commissie medewerking zou verlenen aan export naar Frankrijk, alvorens de regering daarover met de Kamercommissies van Buitenlandse Zaken en Kernenergie overleg zou hebben gepleegd. Dit geeft het parlement dus de gelegenheid om, zo leveranties aan Frankrijk actueel zouden worden, op dit punt zeer expliciete garanties van de regering te verlangen.

Het geheel overziende meen ik dat de overeenkomst, aangevuld in de in mijn motie bepleite zin, een zodanig samenstel van bepalingen bevat ter voorkoming van misbruik van het UC-project voor militaire doeleinden, dat het risico daarvan niet groter behoeft te worden geacht dan bij andere industriële ondernemingen op het gebied van het vreedzaam gebruik van kernenergie. Waarmee uiteraard niet gezegd is, dat een voortdurend evalueren van de mogelijkheden om de effectiviteit van de controle op het vreedzaam gebruik van kernenergie te vergroten niet tot de meest essentiële onderdelen van een actief vredesbeleid zou behoren. In tegendeel, het lijkt mij onontbeerlijk dat dit steeds weer gebeurt.

1) Handelingen Tweede Kamer 1970-1971, blz. 3087/3134.

