

# ITER: Werk aan 's werelds grootste vacuümvaten

Al heel lang verwachten we dat het nog tientallen jaren duurt voordat we energie kunnen opwekken met behulp van kernfusie. In mei dit jaar werd bekend dat we weer langer moeten wachten op de inwerkingstelling van de ITER-fusioreactor in het Zuid-Franse Saint-Paul-lès-Durance. Het eerste plasma in de tokamak wordt nu op zijn vroegst verwacht in 2022 of 2023 en pas in 2027 zal de reactor op vol vermogen draaien en dan 500 MW aan elektriciteit genereren. Maar toch, als je rondloopt op de plaats waar ITER gebouwd wordt, dan voelt het of de fusioreactor al bijna tastbaar is. De eerste gebouwen zijn inmiddels klaar, waaronder de grote hal waarin straks de cryostaat, het grootste vacuümvat ter wereld, in elkaar wordt gezet. In een gesprek met Carlo Sborchia, hoofd van de afdeling vacuümvaten van ITER, wordt duidelijk wat op dit moment de belangrijkste problemen zijn op het gebied van vacuümtechniek. Claud Biemans

360



**Figuur 1** Carlo Sborchia. Foto: Robert Arnoux, ITER Organisation.

ITER is een megaproject waarin China, India, Korea, Japan, Rusland, de Verenigde Staten en de Europese Unie samenwerken. Elk individueel land neemt 9% van de kosten voor zijn rekening en de EU 45%. In ruil daarvoor wordt de aanbesteding van het werk gelijk verdeeld over de deelnemende landen. Dat heeft tot gevolg dat bepaalde onderdelen in gedeelten door verschillende landen worden geproduceerd en maakt ITER niet alleen technisch, maar ook organisatorisch zeer complex. Door het grote aantal deelnemende landen, die ongeveer de helft van de wereldbevolking vertegenwoordigen, is het project ook zeer gevoelig voor politieke omstandigheden en bezuinigende regeringen. En ieder uitstel maakt het project natuurlijk alleen maar duurder. Zo bekeken zijn de technische uitdagingen misschien nog wel het meest overzichtelijk...

### Strengere kwaliteitseisen

Carlo Sborchia is sinds november 2012 hoofd van de afdeling vacuümvat van ITER. Hij is bereid om mij na een lange werkdag nog speciaal op te zoeken om te vertellen over het werk waar zijn team dag in dag uit mee bezig is. Hij is verantwoordelijk voor enkele belangrijke onderdelen van ITER, waaronder het vacuümvat van de tokamak en de cryostaat. Het vacuümvat bestaat uit negen sectoren, waarvan er twee in Korea en zeven in opdracht van de Europese Unie door een Italiaans consortium worden geproduceerd. Korea levert ook de zeventien middelste en negen onderste toegangspoorten. De achttien bovenste poorten worden in Rusland gemaakt.

Het plasma in de tokamak wordt gecontroleerd met behulp van supergeleidende magneten die om het vacuümvat geplaatst worden. Het geheel wordt sterk gekoeld en is daarom geplaatst in een cryostaat die door India wordt gemaakt. Op het moment dat de fusiereactor in bedrijf is, zijn deze onderdelen niet meer toegankelijk en daarom worden zeer strenge kwaliteitseisen gesteld.

### Andere werkwijze

Elke sector van het vacuümvat bestaat uit vier segmenten die aan elkaar gelast worden. Sborchia vertelt dat hiervoor in Korea een andere werkwijze gekozen is dan in de Europese Unie: "Het verschil is dat de Koreanen kie-

$E = mc^2$

Bij kernfusie smelten twee lichte atomen samen zodat een zwaarder atoom ontstaat. Daarbij wordt een klein gedeelte van de massa omgezet in veel energie. Het meest bekende voorbeeld van kernfusie is de zon. In ITER smelten deuteriumatomen samen met tritiumatomen. Bij deze fusiereactie ontstaat helium en komt een neutron vrij. Kernfusie vindt alleen plaats bij zeer hoge temperaturen. Er is een ingewikkeld apparaat nodig waarin een zeer heet plasma gemaakt kan worden, dat met behulp van magneetvelden wordt opgesloten, zodat het de wanden niet raakt. Het kost dus eerst veel energie om een fusiereactie mogelijk te maken. ITER is zo ontworpen dat er tien keer meer energie uitkomt dan erin gaat. Dit is de eerste stap op weg naar nog meer en grotere kernfusiecentrales.

deuterium helium  
 $2\text{H}$   $4\text{He}$   
tritium neutron  
 $3\text{H}$  n

**Figuur 2** Kernfusie in ITER: deuteriumatomen fuseren met tritiumatomen, waarna heliumatomen en snelle neutronen ontstaan.



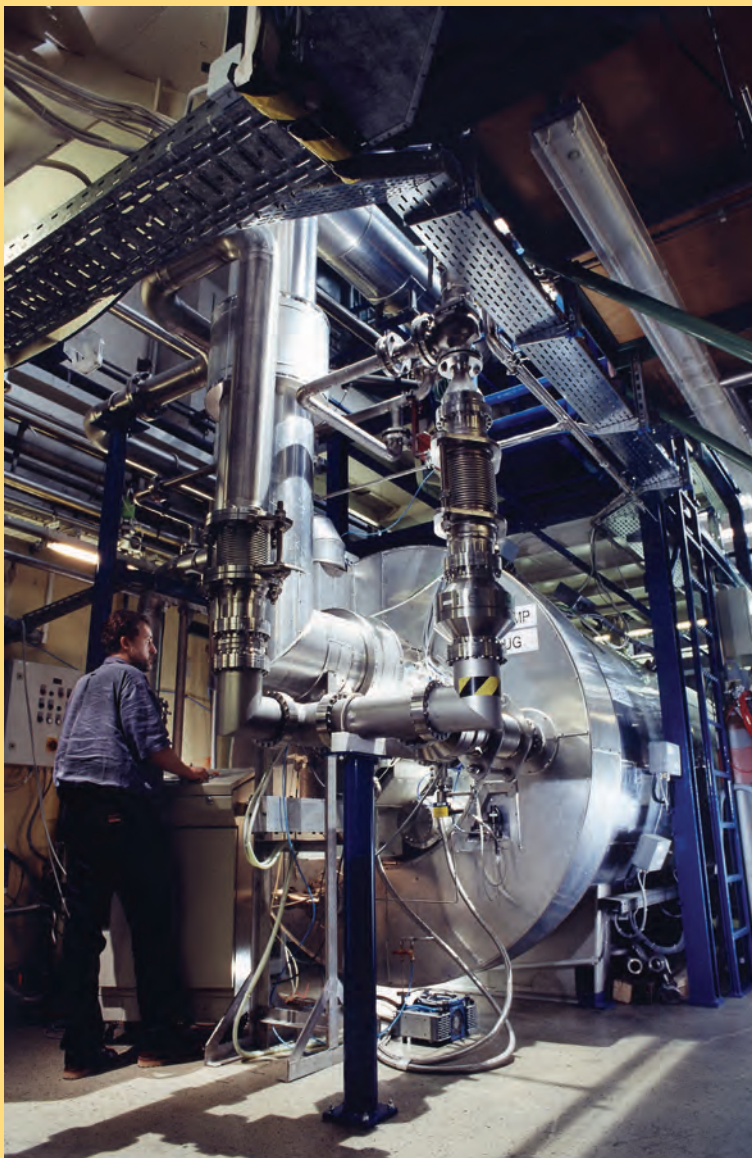
**Figuur 3** Werk aan de fundering van de tokamak en cryostaat in mei 2014. Foto: Claud Biemans.

zen voor TIG-lassen (tungsten inert gas), terwijl de Europeanen kiezen voor elektronenstraallassen om de vervorming van het materiaal te beperken. Een ander verschil is dat de Koreanen een heel grote mal gebruiken om de segmenten voor het lassen te fixeren. Zij denken dat de geometrie van de sector met behulp van deze stevige

mal binnen de zeer kleine toleranties blijft. Na het verwijderen van de mal hoeft de vorm van de complete sector dan niet verder bewerkt te worden. De Europeanen geven juist de voorkeur aan een lichte mal en ze bewerken na het aflassen de hele sector nog na om de geometrie binnen de tolerantie te krijgen. Hierdoor kan toch een ver-

## Het ITER-vacuümvat

Het vacuümvat heeft de vorm van een donut en beschikt over in totaal 44 toegangspoorten voor pompen en meet- en regelapparatuur. De interne diameter wordt 6 meter, de buitendiameter 19 meter, de hoogte 11 meter, en het volume 1.400 m<sup>3</sup>. Inclusief alle onderdelen gaat de tokamak meer dan 5000 ton wegen. Voordat de fusiereactie kan starten moet de tokamak met behulp van mechanische en cryogene pompen gedurende een of twee dagen leeggepompt worden, zodat er geen moleculen overblijven die het plasma kunnen verstoren. Voordat het plasma gemaakt wordt, is er een dichtheid van ongeveer een microbar in het vacuümvat. Het plasma krijgt uiteindelijk een temperatuur van 150 miljoen °C. De binnenkant van het vacuümvat wordt door 440 *blanket*-modules (gemaakt van beryllium, koper en staal) beschermd tegen de hoge temperatuur en de snelle neutronen die samen met helium ontstaan bij de fusiereactie tussen deuterium en tritium. Onder in de tokamak bevindt zich de *divertor*, gemaakt van wolfram, die onder andere zorgt voor de afvoer van warmte. Als de tokamak in bedrijf is, zorgen cryogene pompen voor het verwijderen van afvalstoffen, zoals helium. Daarvoor zijn de koude oppervlakken van deze pompen gecoat met houtskool, gemaakt van fijn gemalen bast van Indonesische kokosnoten.



**Figuur 4** Een model voor een cryogene pomp voor ITER, getest in het Karlsruhe Instituut voor Technologie, Duitsland. Foto: Forschungszentrum Karlsruhe (FZK).

schil in geometrie ontstaan tussen de Koreaanse en Europese sectoren. Dat zou problemen kunnen opleveren op het moment dat de negen sectoren aan elkaar vast worden gemaakt. Het kan ook problemen opleveren op het grensvlak met de *blanket* en de *divertor* (zie het kader *Het ITER-vacuümvat*), die precies op maat gemaakt moeten worden, zodat ze op de sectoren van het vacuümvat passen. Als er een verschil is in toleranties tussen de verschillende sectoren, dan moeten stukken van de *blanket* en de *divertor* net anders bewerkt worden. De ingenieurs kunnen daar natuurlijk wel weer een mouw aan passen, maar dat kost allicht meer tijd en geld.”

### Prototype

Sborchia: “ITER is de eerste industriële fusiemachine, het is geen laboratoriumspeeltje meer. Maar het is natuurlijk de allereerste machine van zijn soort. Bij het produceren van de eerste sectoren van de tokamak loop je natuurlijk tegen onverwachte problemen aan. Ondanks dat de bedrijven die de aanbesteding hebben binnengesleept proefmodellen moesten laten zien voor deze onderdelen, kon het voorbereidende werk natuurlijk niet op volle schaal plaatsvinden. Je moet de eerste Koreaanse en Europese sectoren zien als een prototype waarmee de bedrijven leren hoe ze de volgende sectoren kunnen maken.”

Een complicerende factor bij het maken van onderdelen van de tokamak is dat het plasma het radioactieve tritium bevat. Ook al zal dat nooit meer zijn dan een gram, het maakt de wanden van het vacuümvat radioactief door opname en neerslag van tritium, en door reacties met de neutronen. Sborchia: “Deze onderdelen moeten daarom ook nog eens voldoen aan de Franse nucleaire veiligheidsregels. En dat is niet makkelijk omdat de Franse nucleaire autoriteit weliswaar zeer bekend is met de onderdelen van ‘gewone’ kernreactoren en met reactorvaten die onder hoge druk werken, maar hier gaat het om het allereerste vacuümvat van dit type. En dat wordt ook nog eens belast met elektromagnetische velden, iets wat niet gebeurt in kernreactoren.”

De plaatsvervangend algemeen directeur van ITER Korea, Hyeon Gon Lee, die ik spreek tijdens het bezoek aan ITER, geeft aan dat het voldoen aan de nucleaire veiligheidsregels tot

nu toe de grootste uitdaging was. De onderdelen moeten daarbij op een 100% niet-destructieve manier getest kunnen worden. Sommige onderdelen komen op een plaats in de reactor waar het heel moeilijk gaat worden om daar op een later tijdstip fouten op te sporen. Dus wordt er geëist dat de lassen tussen de segmenten perfect zijn. De cryostaat hoeft niet aan de nucleaire veiligheidseisen te voldoen omdat die niet in direct contact staat met de radioactieve stoffen. Maar hier spelen dezelfde problemen bij de nauwkeurigheid van het laswerk en mogelijke vervormingen van het materiaal, omdat de onderdelen heel zwaar zijn.

### Lange lijsten

Alle veiligheidseisen brengen ook een enorme hoeveelheid administratief werk met zich mee. Alle ontwerp- en productiedocumenten moeten uiteindelijk goedgekeurd worden door de centrale ITER-organisatie en een extra controlerende instantie, de Agreed Notified Body. Sborchia: "Het gaat om honderden documenten met lange lijsten van alle gegevens van alle onderaannemers, leveranciers, bewerkers, enzovoort. En dit voor elke productiestap, alle materialen, het snijden en vormen van de platen, het lassen. Mijn afdeling bestaat uit 40 mensen, waarvan 25 in dienst van de ITER-organisatie en 15 ingehuurde krachten. Bij elke Domestic Agency (DA) van de deelnemende landen werkt een aantal mensen voor ons. Het idee is dat de ITER-organisatie beslist over de totale constructie, terwijl de DA's gaan over de aanbesteding van opdrachten en contracten. Dat levert soms moeilijkheden op als wij speciale wensen hebben, want de leveranciers rapporteren aan de DA en niet aan ons. Als er dus een technisch probleem is, praten wij met de DA en niet direct met de leverancier. Maar de DA's zijn niet technisch verantwoordelijk. Dat is ITER zelf, maar zij heeft weer geen zeggenschap over de contracten. Maar ik heb goede ervaringen. Ik werk er elke dag aan om goede relaties met de DA's te onderhouden. Onze samenwerking verloopt goed en samen proberen we zoveel te bereiken als mogelijk is. Wij wisselen zoveel mogelijk informatie en knowhow uit en zo proberen we alle problemen op te lossen."

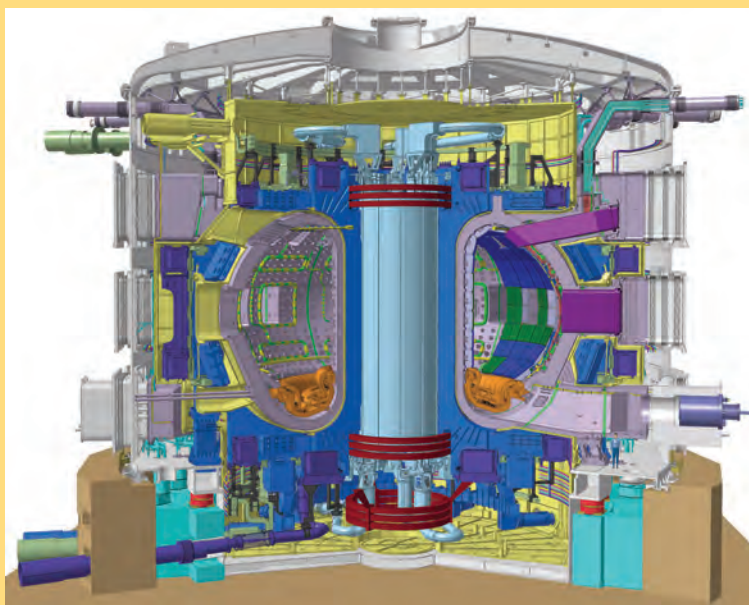
Dit artikel verscheen eerder in NEVAC blad 52/2, september 2014.

## Cryostaat

De cryostaat krijgt een diameter van ongeveer 30 meter, een hoogte van ongeveer 25 meter en een volume van  $8.500 \text{ m}^3$ . Het massieve vacuümvat van de cryostaat, nodig om de tokamak te koelen, wordt in vier segmenten geproduceerd in India. In een speciaal ontworpen loods bij ITER in Frankrijk worden 54 kleinere delen aan elkaar vastgemaakt. Dat proces zal nog zeven jaar duren. Daarna wordt het vat in zijn geheel naar zijn definitieve positie verplaatst. Naar verwachting arriveren de eerste onderdelen van de cryostaat eind 2015 bij ITER in Frankrijk. De cryostaat heeft vele openingen, sommige met een diameter van wel vier meter, voor de buizen van koel- en verwarmingssystemen, voedingen voor de magneten, diagnostische systemen en voor het verplaatsen van onderdelen van de *blanket* en de *divertor*. Grote balgsystemen tussen de tokamak en de cryostaat zorgen ervoor dat de constructies kunnen krimpen en uitzetten als de temperatuur verandert. Om neutronen tegen te houden is de cryostaat omgeven door een laag beton, die aan de bovenkant twee meter dik is.



Figuur 5 De buitenkant van de cryostaat. Afbeelding: ITER Organisation.



Figuur 6 Een opengewerkt model van de tokamak van ITER. Afbeelding: ITER Organisation.