

KIVI factsheet: “Kunnen startups de grootschalige commerciële invoering van kernfusie versnellen?” Mario van der Borst/Anton Arnoldus

Samenvatting

Het beheersen van kernfusie wordt door velen beschouwd als een mogelijke oplossing voor de toekomstige energievoorziening en is sinds de jaren vijftig de droom van onderzoekers en onderzoekslaboratoria. In de afgelopen 75 jaar is er enorme vooruitgang geboekt bij het beheersen van deze energiebron. Hoe indrukwekkend deze vooruitgang ook is, duidelijk is dat industriële toepassing van dit onderzoek nog ontbreekt. "Kernfusie is nog 30 jaar weg... en dat is nu al 50 jaar", horen we vaak. De laatste jaren begint de particuliere sector (startups) echter belangstelling op dit gebied te tonen.

Regelmatige publicaties door deze startups op het gebied van kernfusie geven het publiek de indruk dat de invoering van fusie als grote energiebron snel dichterbij komt.

Zullen deze particuliere bedrijven slagen waar de grote internationale samenwerking slechts in babystapjes vordert?

Naar onze mening kunnen startups complementair zijn in de weg naar een industriële toepassing van kernfusie. Het betreft een verfrissende totaal andere aanpak dan van de gevestigde instituten. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een van de startups of een combinatie ervan zal leiden tot een commercieel werkende fusiecentrale. Het is echter zeer goed mogelijk dat veel van de uitgewerkte ideeën van deze startups verwerkt zullen worden in een volgend groot demonstratieproject, zoals de opvolger van ITER (DEMO). In tegenstelling tot ITER moet DEMO werkelijk netto energie moet gaan leveren.

Inleiding

In de krant en andere media wordt regelmatig mededeling gedaan van baanbrekende resultaten van experimenten op het gebied van kernfusieonderzoek. Kernfusie belooft een zon op aarde, met een haast onbeperkte energiebron, zonder veiligheidsproblemen en langlevend radioactief afval. Ondanks dat de resultaten baanbrekend worden genoemd, blijkt de commerciële invoering van kernfusie toch steeds zo'n 30 tot 50 jaar in de toekomst te liggen. Op dit moment is een netto positieve energieopwekking m.b.v. kernfusie nog niet mogelijk. Men weet dus eigenlijk nog niet wat de eigenschappen van een kernfusie-installatie zullen zijn. Verwacht wordt dat toekomstige kernfusie de volgende voor- en nadelen zal hebben:

Voordelen

- Brandstof is wereldwijd en bijna onbegrensd ter beschikking.
- Klimaatneutraal, geen CO2 uitstoot.
- Ongelukken waarbij grote hoeveelheden radioactiviteit vrij komen zijn niet mogelijk.
- Geen hoogradioactief afval, dus geen eindberging noodzakelijk.

Nadelen

- Grote investeringskosten
- Geringe hoeveelheid laag radioactief afval
- Stroomproductie pas verwacht ver na 2050

Principe van Kernfusie

Kernfusie is een ander proces dan kernsplijting, waarmee nu kernenergie wordt opgewekt. Bij **kernsplijting** wordt uranium of plutonium gesplitst, terwijl bij **kernfusie** atomen samenkomen. De **zon** doet al miljarden jaren aan kernfusie. Terwijl kernsplijting alleen mogelijk is met zeer zware atomen, werkt kernfusie alleen met juist zeer lichte atomen. Twee methoden worden onderzocht om tot energieopwekking met kernfusie te komen, namelijk d.m.v. magnetische opsluiting en traagheidsopsluiting.

Bij **kernfusie door magnetische opsluiting** wordt met behulp van magnetisme een plasma in bedwang gehouden waarin twee waterstofkernen (Deuterium en Tritium) onder hoge druk en bij een zeer hoge temperatuur (150 miljoen graden Celcius) kunnen smelten tot helium, waarbij energie vrijkomt. Voorbeelden van machines die volgens dit principe werken, zijn de tokamak, de stellarator en de polywell. In theorie is het mogelijk om meer energie uit kernfusie te halen dan dat erin gaat.

Fig.1 geeft de fusiereactie weer en fig.2 het principe van de tokamak. Het plasma (oranje) zit in de mantel in de vorm van een torus. De magneten zorgen ervoor dat het plasma niet tegen de wand komt. Water wordt door de mantel geleid en tot stoom verhit (blauwrode buis). Met de stoom (via een stoomturbine) wordt elektriciteit opgewekt.

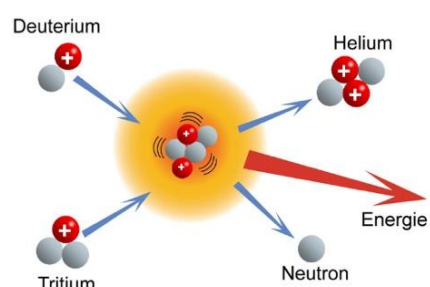


Fig. 1

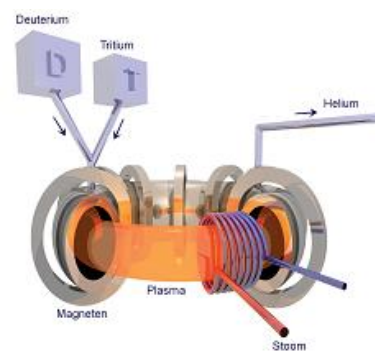


Fig. 2

Kernfusie met behulp van hoogenergetische lasers

Laserfusie is een methode om kernfusiereacties op gang te brengen door brandstof in de vorm van pellets welke deuterium en tritium bevatten, te verhitten en samen te drukken. Het is een veelbelovende methode om gecontroleerde kernfusie te bereiken.

Bij de laserfusiebenadering blijft er geen afval over om te recyclen en veroorzaken de materialen geen activeringsproblemen. Hierdoor produceert laserfusie geen grote hoeveelheden hoogactief nucleair afval dat voor lange tijd moet worden opgeruimd. Kernfusie met lasers is een vorm van traagheidsinsluiting.

Kernfusie door middel van een schokgolf

Dit is een andere vorm van traagheidsinsluiting. Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht om met een elektromagnetisch kanon projectielen af te vuren op een target en daarmee een schokgolf te weeg te brengen, waardoor een kernfusie proces wordt geïnitieerd. De schokgolf kan ook door middel van een zuiger gecreëerd worden. Met deze technieken zijn nog nergens in de wereld kernfusiereacties gecreëerd.

Mogelijke fusiereacties

Om een fusiereactie mogelijk te maken moeten twee atoomkernen samengevoegd worden. Atoomkernen zijn positief geladen. Door zogenaamde Coulombkrachten stoten de atoomkernen elkaar af (Coulombbarrière). Zeer hoge temperaturen zijn nodig om de reactie toch mogelijk te maken. In figuur 3 is de reactiviteit (kans op een reactie) gegeven voor veelbelovende reacties. Deze figuur maakt duidelijk waarom in de meeste onderzoeken gekozen wordt voor de deuterium-tritium-reactie (D-T).

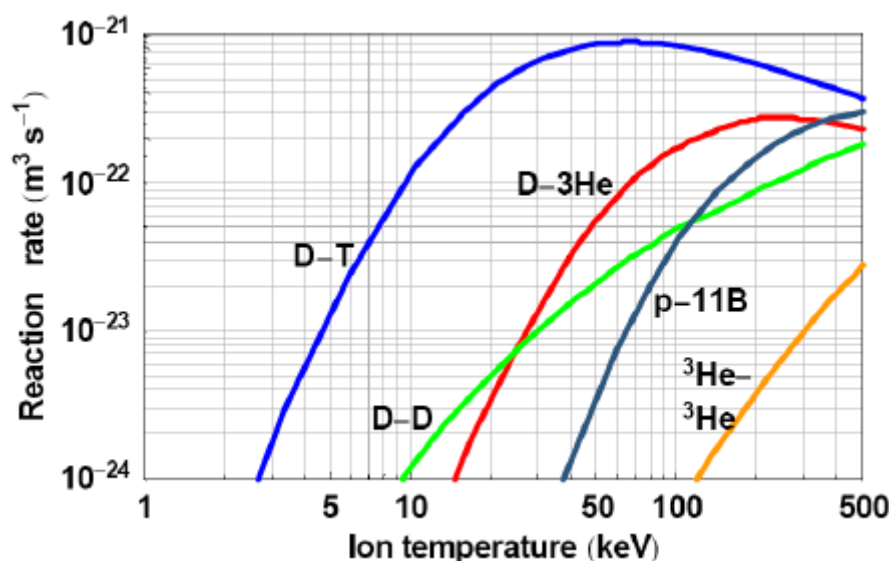
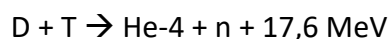


Fig 3.

De energie van 1 eV correspondeert met een temperatuur van 11.331 graden Celsius.

De D-T reactie resulteert in een He-4 en een neutron. De kinetische die vrijkomt bij de reactie wordt voor een groot gedeelte meegegeven aan het neutron. Energieafgifte van de neutrale deeltje aan de omgeving is moeilijk, maar niet onmogelijk.

Reacties waarbij geen neutronen ontstaan zijn voor de warmteafgifte aantrekkelijker. Dit wordt **aneutronic fusion** genoemd. Met name de Boron-11 – proton reactie wordt hierbij bestudeerd. T.o.v. de D-T reactie zijn hierbij 10 keer hogere temperaturen vereist. Voordelen hierbij zijn dat boron-11 beter beschikbaar is dan tritium en de hiervoor genoemde betere warmteafgifte.

Research

ITER

In november 1985 besloten de toenmalige Kremlin-Chef Michail Gorbatschow en de Amerikaanse president Ronald Reagan tot de bouw van een Kernfusie-installatie, "voor het welzijn van de hele wereld". China, India, Japan, Korea, EU plus Zwitserland en de Russische Federatie hadden interesse getoond in het ITER onderzoeksproject. ITER staat voor (International Thermonuclear Experimental Reactor). ITER betreft een magnetische

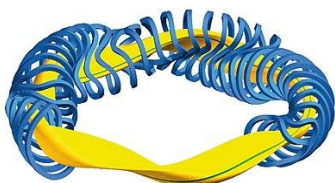
opsluiting reactor, welke gebruik maakt van een zeer grote tokamak, welke gebruik maakt van magnetische spoelen met super geleiding bij extreem lage temperaturen. In de ITER tokamak komen de laagst mogelijke en de hoogst mogelijke temperaturen samen. Het Nederlandse onderzoeksinstituut DIFFER werkt samen met ITER. Het is het grootste wetenschappelijk project ter wereld en wordt uitgevoerd in Cadarache, Zuid-Frankrijk. Het doel van ITER is om aan te tonen, dat gecontroleerde energieopwekking met kernfusie mogelijk is.



Bouw werelds grootste kernfusiecentrale ITER.

De **Wendelstein 7-X** is een **experimentele** Kernfusiereactor in Greifswald, Duitsland. Het totale project heeft 19 jaar geduurd en de bouw van de reactor is voltooid in oktober 2015 door het Duitse Max Planck-Instituut voor Plasmafysica.

Een stellarator heeft een aantal voordelen ten opzichte van de meer gebruikelijke installatie voor kernfusie, de torus -vormige tokamak. Hierin wordt het magneetveld dat nodig is om het plasma op te sluiten voor een deel gemaakt door een elektrische stroom door het plasma te sturen.



Voorbeeld van een stellarator ontwerp, zoals toegepast in de Wendelstein 7-X een systeem van spoelen (blauw) omringt het plasma (geel). Een magnetische veldlijn op het plasma is aangeduid in het groen.

Fig.4

De stellarator (Fig.4) is een zeer complex ontwerp. Een fusiecentrale gebaseerd op dit concept kan compacter gebouwd worden dan het ITER ontwerp doordat het hele transformatorjuk komt te vervallen. Het plasma is bovendien stabiel en plasma's van langere tijdsduur kunnen eenvoudiger gemaakt worden.

De **National Ignition Facility (NIF)** van het Amerikaanse Lawrence Livermore National Laboratory is het belangrijkste instituut dat zich bezig houdt met onderzoek op het gebied van Laser Fusie. NIF past de zogenaamde Inertial Confinement Fusion (ICF) methode toe, waarbij de laserenergie wordt afgezet in de buitenste laag van een D-T doelwit, die naar buiten explodeert. Dit produceert een reactiekracht in de vorm van schokgolven die door het doelwit gaan. De golven comprimeren en verwarmen het doelwit. Voldoende krachtige schokgolven genereren een D-T-fusie reactie.

Regelmatig worden door NIF baanbrekende onderzoeksresultaten gepubliceerd. Op 14 december 2022 wist men te rapporteren dat wetenschappers bij een laserfusie-experiment meer energie produceerden uit de zelfvoorzienende fusiereactie dan ze erin stopten om de

reactie te creëren. Hoewel het schot van december 2022 op NIF een record van 3,15 megajoule energie produceerde uit een laserpuls van 2,05 megajoule, was voor het genereren van die puls honderden megajoule elektriciteit nodig en NIF kan maar één schot per dag maken. De meeste fusie-experts geven nog steeds betere kansen aan tokamaks. Maar een groot voordeel van ICF-faciliteiten ten opzichte van tokamaks is dat hun verschillende elementen (lasers, reactiekamers, doelen) afzonderlijk kunnen worden ontwikkeld en getest voordat ze moeten worden gecombineerd. Het bouwen van een tokamak is alles of niets en buitengewoon moeilijk te veranderen als het eenmaal voltooid is.

Koude Kernfusie

Koude kernfusie is kernfusie die zou optreden bij een relatief lage temperatuur. De naam koude kernfusie werd oorspronkelijk gebruikt voor de fusie van waterstofisotopen met behulp van Muonen als katalysator. De elektronen van de waterstofatomen worden door muonen vervangen, daardoor kunnen de atomen onderling zo dicht bij elkaar gebracht worden dat de elektrische afstoting overwonnen wordt en een fusie van de atoomkernen mogelijk wordt. Tegenwoordig wordt de naam "koude kernfusie" voornamelijk gebruikt voor de mogelijkheid van kernfusie bij temperaturen rond 0 graden Celcius. Volgens de huidige wetenschap is dat onmogelijk. Het Nederlandse bedrijf Convector N.V. heeft in 1985 geprobeerd om synthetische bolbliksems te maken door middel van schakelvonken waarbij stromen van ongeveer 200.000 ampère lopen, en deze te stabiliseren. Het bedrijf ging uit van de theorie dat de energiebron van een bolbliksem een vorm van kernfusie was. Hieruit is nooit een serieus resultaat gekomen.

Startup bedrijven op het gebied van kernfusie

Naast de hierboven genoemde initiatieven, door internationaal gerespecteerde instituten, zijn er de laatste jaren meer dan 30 particuliere fusiebedrijven in de wereld opgestaan. Inmiddels hebben al achttien bedrijven in de media aangegeven dat ze voldoende financiering hebben aangetrokken om enkele jaren vooruit te komen. Het gaat om meer dan twee miljard euro. Bijna volledig uit particuliere investeringen. Er zijn vele hindernissen te overwinnen om stabiele energieopwekking met kernfusie mogelijk te maken. De grote instituten proberen deze hindernissen parallel op te lossen, m.b.v. grote investeringen en multidisciplinaire ontwikkelingsteams van geleerden en ingenieurs. Vanwege de benodigde grote investeringen is het moeilijk bij deze aanpak om van een gekozen pad af te wijken. Bijvoorbeeld het huidige ITER ontwerp is gebaseerd op de stand der techniek van 15 jaar geleden. Toen was bijvoorbeeld supergeleiding bij hogere temperaturen nog niet mogelijk. Hierdoor zijn de magneetspoelen van de tokamak groter dan noodzakelijk. Terugkomen op dit belangrijke ontwerpuitgangspunt zou hoge kosten en grote vertragingen met zich meebrengen. De startups richten zich over het algemeen op slimme ideeën, die voort zijn gekomen uit de internationale onderzoeksteams, maar niet of moeilijk in te brengen waren in de huidige onderzoeksprogramma's. Ze focussen zich meestal op een van de op te lossen problemen. Grondig multidisciplinair onderzoek wordt hierbij vervangen door uitwerking van slimme ideeën in relatief kleine teams. Dit is een risicovolle tactiek, maar de beloning kan extreem hoog zijn als ze succesvol zijn. Waar zijn deze projecten? Hier volgt een kort overzicht.

| Bedrijf | Fusie methode | Fusie reactie | Focus van bedrijf |
|---|---|---------------------------------|--|
| General Fusion (USA) | Schokgolf middels zuiger | D-T | Schokgolf m.b.v. zuiger, welke D-T plasma comprimeert |
| CFS Commonwealth Fusion Systems) (USA) | Tokamak | D-T | Compacte tokamak m.b.v. magneten werkend met supergeleiding bij hogere temperaturen |
| Helion Energy (USA) | FRC (Magnetische opsluiting) | D-3He (aneutronic) | Zonder tussenkomst stoom opwekken elektriciteit door gebruik te maken van de inductie in de elektrische spoelen rondom het plasma. Verdere ontwikkeling van FRC en productie van 3He uit D-D-reactie. |
| Longview Fusion (USA) | Laserfusie | D-T | Werkt in lijn met NIF, maar richten zich op 2X hoger vermogen en >100 pulsen per minuut. Ontwikkeling van target omhuld in lood i.p.v. goud. |
| Focused Energy (GER and USA) | Laserfusie | D-T | Werkt met twee lasers i.p.v. één. De brandstofpellet bij NIF moet symmetrisch imploderen om spontaan te ontbranden. Door met 2 lasers te werken is minder symmetrie vereist. |
| First Light Fusion (UK) | Schokgolf middels elektromagnetisch kanon | D-T | Projectielen worden met een elektromagnetisch kanon weg geschoten om een kleine metalen kubus met daarin een brandstofcapsule kapot te slaan. De resulterende schokgolf versnelt en kanaliseert, wat kan resulteren in een kernfusie reactie |
| Marvel Fusion (GER) | Laserfusie | boron-11/waterstof (aneutronic) | Ontwikkeling pellets voor boron-11/waterstof-reactie. |
| HB11 (USA) | Laserfusie | boron-11/waterstof (aneutronic) | Ontwikkeling pellets voor boron-11/waterstof-reactie. HB11 wil rechtstreeks elektrische energie opwekken. Dit zou kunnen |

| Bedrijf | Fusie methode | Fusie reactie | Focus van bedrijf |
|---------|---------------|---------------|--|
| | | | omdat bij iedere reactie 3 geladen alfadeeltjes (He-4) vrijkomen |

Conclusie

De weg van de grote instituten in de wereld naar de commerciële toepassing van kernfusie is nog lang. Startups kunnen complementair zijn op de weg. Het betreft een verfrissende totaal andere aanpak dan van de gevestigde instituten. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een van de startups of een combinatie van startups zal leiden tot een commercieel werkende fusiecentrale. Het is echter zeer goed mogelijk dat veel van de uitgewerkte ideeën van deze startups verwerkt zullen worden in een volgend groot demonstratieproject, zoals de opvolger van ITER (DEMO).