

ITER – pot

Janez Strnad

Zlivanje

V vesolju se največ energije sprosti v zvezdah pri *zlivanju atomskih jeder* ali *fuziji*. Atomska jedra se zaradi pozitivnih nabojev med seboj odbijajo. Privlačna jedrska sila jedri spoji, ko se pri trku dovolj približata, če trčita z dovolj veliko hitrostjo. Velike hitrosti dosežejo molekule v plinu pri visoki temperaturi. Zaradi visoke temperature se pri trkih molekule razdelijo na atome, atomi izgubijo elektrone in nastane *plazma* pozitivnih in negativnih ionov in negativnih elektronov. Jedra se zlivajo v plazmi pri dovolj visoki temperaturi, odtod še tretje ime za zlivanje – *termonuklearna reakcija*.

Energija se sprosti tudi pri cepitvi zelo težkih atomskih jeder ali *fisiji*. Verižne reakcije so zmožna jedra izotopov urana 233 in 235 ter plutonija 239 (urana 233 in plutonija ni v naravi). Na svetu deluje veliko jedrskih reaktorjev na uran 235. Če izvezemo poskuse zadrževanja, pa so zlivanje dosegli le v »vodikovi bombi«. V njej del energije izvirata od zlivanja, ko bomba na cepitev segreje snov.

Največ obeta zlivanje jeder vodikovih izotopov. Jedro devterija iz protona in nevtrona se zlije z jedrom tritija iz protona in dveh nevtronov v jedro helija iz dveh protonov in dveh nevtronov in nevtron:



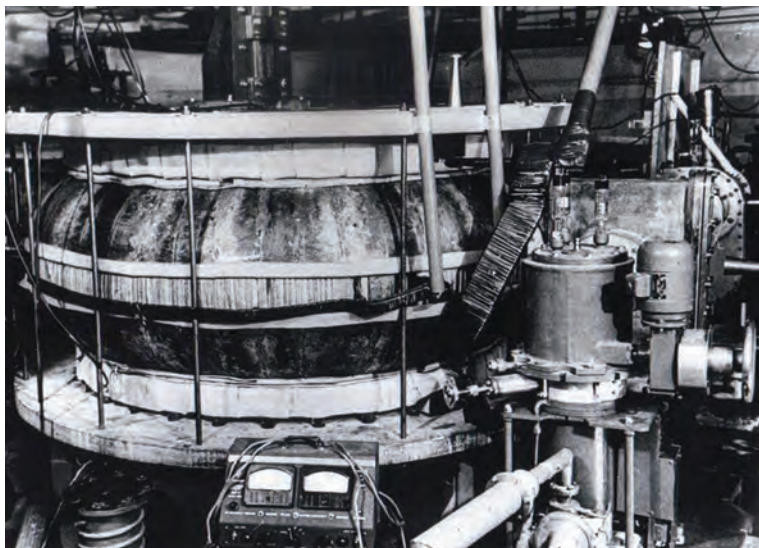
1 gram mešanice iz 0,4004 grama devterija in 0,5996 grama tritija se zlije v 0,7957 grama helija in 0,2005 grama nevtronov. Skupna masa se zmanjša za 3,754 miligrama in sprosti se 93,7 megawattur energije. 93,7 MWh ustreza malenkost več kot 8 tonam

ekvivalentne nafte. V teh enotah (tons of oil equivalent, toe) merijo energijo v pregledih o porabi.

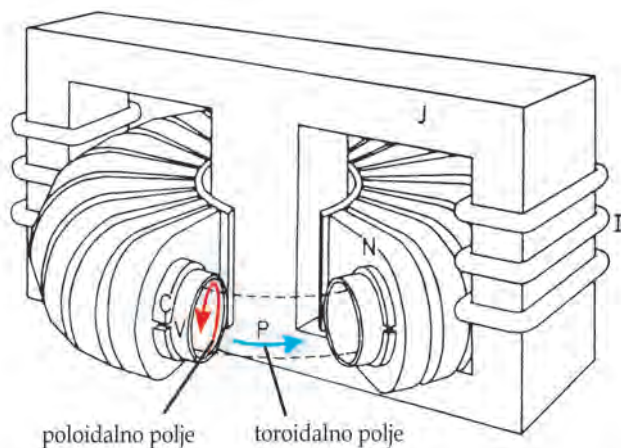
Za termonuklearno reakcijo potrebna temperatura je tem višja, čim večji naboj imata jedri. Najnižja je ta temperatura pri vodikovih jedrih. Vodikova jedra se zlivajo v zvezdah z razmeroma majhno maso, kakršna je Sonce. V zvezdah z vse večjo maso se zlivajo vse težja jedra. Velik tlak v plazmi pri zelo visoki temperaturi v sredici zvezd uravnovesi tlak zaradi gravitacije med deli zvezde. Na Zemlji je treba posebej poskrbeti, da se plazma ne razbeži. Pri *vztrajnostnem zadrževanju* večje število močnih laserskih curkov z vseh strani usmerijo na kapljico ali zrnce vodikovih izotopov. Na površju del snovi odpari, ostali del pa se močno zgosti in segreje. Pri *magnetnem zadrževanju* plazmo zadržuje magnetno polje.

Reaktor na zlivanje, fuzijski reaktor ali *termonuklearni reaktor*, v katerem bi potekalo nadzorovano zlivanje vodikovih jeder, bi odpravil vsaj del skrbi zaradi grozečega pomanjkanja energije. Možnost raziskujejo v številnih državah. V času hladne vojne so bila raziskovanja tajna. Ti časi so minili in danes države pri raziskovanju pogosto sodelujejo.

Z Lawsonovim produktom gostote ionov in časa zadrževanja ocenimo, ali v plazmi pride do zlivanja. V plazmi iz devterija in tritija pri temperaturi sto milijonov stopinj mora produkt preseči mejo 10^{20} s/m^3 . Pri vztrajnostnem zadrževanju ocenimo gostoto delcev na 10^{28} /m^3 in mora čas zadrževanja preseči stomilijonino sekunde, 10^{-8} s . Pri magnetnem zadrževanju pri gostoti delcev 10^{20} /m^3 mora čas zadrževanja preseči 1 sekundo.



Tokamak T-3 v inštitutu Kurčatov v Moskvi (zgoraj) in njegova poenostavljena risba (spodaj): I - ovoji primarne tuljave, J - magnetni jarem, N - dodatni ovoji za toroidalno polje, C - prevodna cev, V - vakuumski posoda, P - plazma pri visoki temperaturi, silnice poloidalnega polja (rdeče), silnice toroidalnega polja (modro).



Tokamaki

Zdaj je prednost na strani magnetnega zadrževanja. Od naprav te vrste največ obeta *tokamak*. Zamisel se je v petdesetih letih prejšnjega stoletja v tedanji Sovjetski zvezi porodila Olegu Lavrentjevu. Izoblikovati sta jo pomagala Igor Tamm in Andrej Saharov, k izdelavi prvih tokamakov je pomembno prispeval Lev Arcimovič. Tokamak je okrajšava ruskega imena *toroidalna kamera s magnetnimi katuškami* (svitkasta celica z magnetnimi tuljavami).

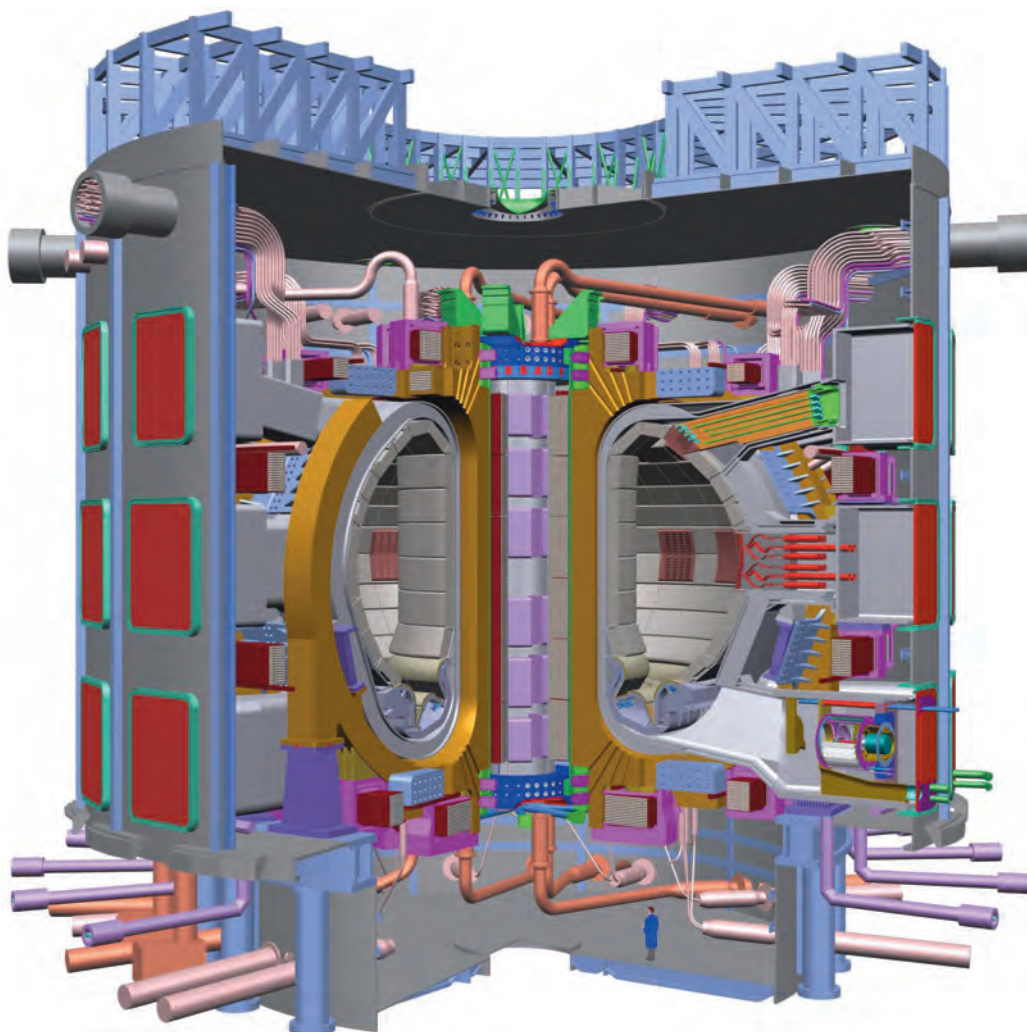
Prvi tokamaki so od daleč spominjali na transformator. Na sklenjeno železno jedro so bili na eni strani naviti ovoji primarne tuljave. Sekundarna tuljava je imela samo en ovoj, in to plin pri majhnem tlaku v vakuumski posodi v obliki *svitka*. Svitek ali torus si ponazorimo z napihnjeno avtomobilsko zračnico. Po primarni tuljavi so pognali kratkotrajen tok tako, da so skozenjo izpraznili velik naelektren kondenzator. Ob tem je inducirana napetost po plinu v vakuumski posodi pognala tok, plin spremenila v plazmo in jo segrela. Tok po plazmi je ustvaril v posodi *poloidalno magnetno polje* s krožnimi silnicami prečno po svitku. Dodati je bilo treba *toroidalno magnetno polje* s silnicami vzdolž svitka. To polje so ustvarili dodatni ovoji s tokom, naviti okoli posode. Silnice polja, ki je nastalo kot sestava obeh polj, so v notranjosti vakuumske posode tekale kot vijačnice.

Naelektreni delci so se gibali po vijačnicah okoli teh vijačnic. Polje pa ni trajno zadrževalo plazme, ker so se v njej pojavile zanjo značilne *nestabilnosti*. Zaradi njih je plazma po določenem času dosegla steno posode in se ohladila. Nato so postopek ponovili.

Danes deluje 27 večjih tokamakov, 14 jih je že prenehalo delovati. Prvi od njih, T-1, je začel leta 1956 delovati na Inštitutu Kurčatov v Moskvi. Nekaj časa so ruski fiziki vodili pri delu s tokamaki. Medtem so se

tokamaki razvili. Doslej največji tokamak je Skupni evropski torus (JET) v Culhamu blizu Oxforda v Angliji. Srednji obseg tlorisa vakuumske posode meri 18 metrov. Posoda ima ovalni presek s premerom 4,2 metra v navpični smeri in 2,5 metra v vodoravni. Z njim so začeli raziskovati leta 1983. Leta 1997 je JET dosegel pri zlivanju moč 16 megawattov (MW) in čas zadrževanja do minute. Sprostilo se je 70 odstotkov energije, ki so jo vložili v segrevanje plazme. Po

Tak bo ITER. Na prvem navedenem spletnem naslovu je mogoče nazorno in sistematično zasledovati vse njegove sestavne dele.





Temelje v Cadarachu so gradili po strogih protipotresnih predpisih.

koncu leta 1999 so se mednarodne pogodbe iztekle. Odtlej JET, ki so ga leta 2004 posodobili, deluje v okviru Angleške komisije za atomsko energijo.

Načrt

Po koncu hladne vojne leta 1985 so na pobudo Rusije in Združenih držav Amerike zasnovali načrt ITER, ki so se mu pridružile Evropska unija, Indija, Japonska, Južna Koreja in Kitajska. Prvotnega imena International Thermonuclear Experimental Reactor (Mednarodni termonuklearni poskusni reaktor) zaradi neprijetnega zvena besede »termonuklearni« ne uporabljajo več, ampak izhajajo iz latinske besede *iter* za pot. Pogodbo za načrt so po trdih in dolgotrajnih pogajanjih podpisali leta 2006. V njej so se podpisnice precej podrobno zavezale o obveznostih, ki jih bodo večinoma izpolnile v obliki naprav. Evropska unija bo prispevala 45 odstotkov in preostalih šest držav vsaka šestino preostanka. Unija je za sodelovanje

z načrtom ITER osnovala posebno enoto **Fusion for Energy** (F4E, Zlivanje za energijo). Napravo naj bi gradili deset let in potem dvajset let z njo delali poskuse. Prvotno predvideni stroški 5 milijard evrov so narasli na 16 milijard evrov. Že to kaže, da je ITER zelo velik mednarodni načrt. Prvo plazmo naj bi dobili leta 2020, z mešanico devterija in tritija naj bi začeli delati poskuse sedem let pozneje.

Za kraj so izbrali Cadarache blizu francoske Azurne obale, približno 60 kilometrov severovzhodno od Marseilla. Tam deluje od leta 1959 raziskovalni center francoskega Komisariata za atomsko energijo in od leta 1988 tokamak Tore Supra. Evropska unija je v zameno za kraj prevzela večino stroškov in Japoncem, ki so se tudi potegovali zanj, priznala vrsto ugodnosti.

ITER naj bi bil korak na poti do termonuklearnega reaktorja in še ne bo dajal električne energije. Oddajal naj bi toplotno moč 500 MW, desetkrat več, kot bodo porabili

za segrevanje plazme. (Za primerjavo: peti blok termoelektrarne Šoštanj oddaja 345 MW električne moči.) Dosegel naj bi do stopetdeset milijonov stopinj, desetkrat več kot v sredici Sonca, in čas zadrževanja do tisoč sekund in več. Električno moč naj bi dajal termonuklearni reaktor **Demonstration power plant** (DEMO, Demonstracijska elektrarna) iz naslednjega rodu, ki ga European Fusion Development Agreement (EFDA, Evropski sporazum o razvoju zlivanja) načrtuje okoli leta 2050. Slovenski podpisnik sporazuma je Institut »Jožef Stefan«.

Po eni od zamisli naj bi energijo plazme z *magnetohidrodinamičnim generatorjem* naravnost pretvorili v električno delo. Tak generator ne bi imel gibajočih se delov in bi dosegel večji izkoristek kot toplotni stroj, ki prejema toploto pri višji temperaturi ter oddaja toploto pri nižji temperaturi in delo. Magnetohidrodinamični generatorji so še na raziskovalni stopnji.

Nekoliko podrobneje opišimo sestavne dele načrta in navedimo nekaj podatkov. Ti opozarjajo na dosednji napredek v razvoju in na drugi strani potrjujejo, da gre za velikopotezni načrt. Tokamak ITER bo tehtal 23 tisoč ton, več kot trikrat več od Eifflovega stolpa. Osrednji del je vakuumška posoda, v kateri bo tlak močno zmanjšan. Srednji obseg njenega tlorisa bo meril 19 metrov. Posoda bo imela ovalni presek s premerom 11 metrov v navpični smeri in 6 metrov v vodoravni. Imela bo prostornino 850 kubičnih metrov. V njeni dvojni jekleni steni bodo dovodi in odvodi za hladilno vodo. Notranje stene posode bo pokrivala *odeja* iz 440 plošč z maso po 4,6 tone, ki bodo preprečevale neposreden stik plazme s steno posode, jo varovale pred visoko temperaturo in delno zaustavile tok nevtronov. Na zunanji strani bo plošče obdajala plast berilija, notranji del pa bosta sestavljala ojačeni baker in jeklo. Odeja je eden od najzahtevnejših delov

naprave. Posebno obremenjen bo *divertor* na njenem dnu, ki bo obložen z volframom. Vakuumška posoda bo imela 44 odprtín za dovode in odvode, na primer za merilnike, dodatno gretje, vakuumske cevi.

Plazmo v vakuumski posodi bo zadrževalo 18 magnetov za toroidalno polje, 6 tuljav za poloidalno polje, osrednja tuljava in več dodatnih tuljav. Morda bo treba dodati še nove tuljave, da bodo preprečile nestabilnosti, ki so jih odkrili nedavno in ki plazmi jemljejo energijo. ITER zares ubira še neraziskane poti. Vsi magneti bodo superprevodni z vodniki s tokom, ohlajenimi na 4 stopnje nad absolutno ničlo. Po ohlajenem superprevodniku tok teče brez upora, tako da za magnetno polje, ko bo doseglo zahtevano gostoto okoli 13 teslov, ne bo potrebno dovajati energije. Vodniki magnetov za toroidalno polje in osrednje tuljave bodo iz zlitine niobija in kositra, vodniki magnetov za poloidalno polje in dodatne tuljave pa iz zlitine niobija in titana.

Vakuumsko posodo in magnetne bo obdajal 29 metrov visoki in skoraj toliko široki *kriostat*, ki bo magnetom v notranjosti zagotovil temperaturo 4 stopnje nad absolutno ničlo. To bo enojna jeklena posoda z odprtinami za dovode in odvode. Na zunanji strani ga bo obdajal 2 metra debeli betonski zaščitni zid. Plazma v vakuumski posodi naj bi dosegla temperaturo 150 milijonov stopinj, temperatura notranje stene vakuumske posode pa naj bi bila 240 stopinj Celzija. To kaže, kako zahtevna bo tehnična izvedba.

Za vakuum bo skrbel eden od največjih vakuumskih sistemov. Mehanične in kriogenске črpalke bodo znižale tlak v vakuumski posodi na milijonino navadnega zračnega tlaka. Pred začetkom delovanja bodo s črpanjem iz posode odstranili vse primesi. Izčrpavanje bo trajalo dan do dva. Delovanje vakuumskega sistema in druge razmere bodo nadzirali na daljavo.

Hlajenju je namenjen razvejen hladilni sistem. Magnetne bodo hladili s helijem pri temperaturi 4 stopije nad absolutno ničlo.

Poleg tega bo odvajal toploto še krog s helijem in s tekočim dušikom pri temperaturi 80 stopinj nad absolutno ničlo. Toploto bo odvajalo več sklenjenih vodnih tokov in nazadnje veliki hladilni stolpi. V njih bo nasprotni tok vode z izhlapevanjem jemal toploto toku vroče vode. Hladilni sistem bo moral odvajati toplotni tok 500 MW in za krajši čas še več kot dvakrat več. To je zelo zahtevna naloga. Vodo bodo zajemali iz Canala de Provence. Odtokajočo vodo bodo po prehodu skozi bazene za nadzorovanje odvajali v reko Durance. Tok vode 33 kubičnih metrov na sekundo bodo dovajali in odvajali po ceveh, od katerih bodo nekatere imele premer več kot poldrugi meter.

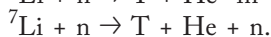
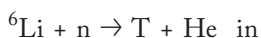
Za segrevanje plazme v posodi ne bo zado-stovalo *obmsko segrevanje* z induciranim električnim tokom. Pomemben del toplote bo prispevalo zlivanje, ko bo steklo. Pred tem bodo toploto dovajali z vbrizgavanjem zelo hitrih nevtralnih delcev in z mikrovalovi. Nevtralnih delcev magnetno polje ne odkloni, zato predrejo globoko v plazmo, se tam ionizirajo in svojo energijo oddajo delcem plazme. Mikrovalovi s frekvenco 40 do 55 MHz bodo poganjali ione, ki bodo pri trkih z drugimi ioni dodatno segreli plazmo, kar spominja na mikrovalovno pečico. Mikrovalovi s frekvenco 170 GHz bodo na podoben način poganjali elektrone.

Napravo bodo upravljali na daljavo. Na daljavo bo treba tudi zamenjati posamezne dele, ki bodo radioaktivni, in jih odložiti v posebej zgrajeno *vročo celico*.

Naprava bo potrebovala za delovanje električno moč 110 MW, za krajši čas celo do 620 MW. Moč bodo dovajali po obstoječem daljnovodu za napetost 400 tisoč voltov, ki ga bodo le za kilometer podaljšali. Gorivo bodo dovajali v vakuumsko posodo s posebnim sistemom za vbrizgavanje plina. Gostoto plazme bodo nadzorovali tudi z uvajanjem kroglic zmrznjenih izotopov vodika. V posodi nikoli ne bo več kot gram vodikovih izotopov. Posebna naprava bo poskrbela, da

neizrabljeno gorivo, ki se bo nabralo v divertorju na dnu vakuumske posode, predelajo in ponovno uporabijo.

Kako je z gorivom? V naravnem vodikcu je 0,015 odstotka devterija, ki ga je razmeroma lahko pridobiti, na primer iz morske vode. Tritij je radioaktiven in razpada z razpolovnim časom 12,5 leta. Zato ga je treba dobiti pri reakcijah jader litija s tremi protoni in tremi ali štirimi nevtroni z nevtroni:



V odeji nameravajo namestiti posebne enote z litijem, v katerih bo pri reakcijah z nevtroni nastajal tritij. Tritij bodo potem izločili in uvedli v vakuumsko posodo.

Mogoče bo zaradi novih spoznanj treba prilagajati načrte. Tveganju se pri prodiranju na neznano območje ni mogoče izogniti. Številni sodelavci načrta ITER menijo, da »skupaj oblikujejo nov model za znanstveno in tehnično sodelovanje v velikem merilu«.

ITER naj bi odprl možnost »okolju prijazne, široko uporabne in praktično neizčrpne« električne energije. Nevtroni, ki nastanejo pri zlivanju, bodo sicer povzročili, da bodo nekateri deli naprave postali radioaktivni. Toda radioaktivnost te vrste je šibka in hitreje razpade kot radioaktivnost, ki nastane pri cepitvi uranovih jeder. Ena od prednosti je, da ne bo nastajal ogljikov dioksid, ki prispeva k segrevanju ozračja.

Precej ljudi nasprotuje načrtu ITER. Nekateri od njih menijo, da bi bilo bolje, če bi denar porabili za izpopolnjevanje obnovljivih virov energije.

Literatura:

ITER: the world's largest tokamak. <http://www.iter.org/mach>.

Tokamak. <http://en.wikipedia.org/wiki/Tokamak>.