Univerza v Mariboru
Fakulteta za naravoslovje in matematiko

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA NARAVOSLOVJE IN MATEMATIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

JEDRSKO ZLIVANJE
projekt fuzijskega reaktorja ITER

Jože Juhart

V seminarju je na kratko predstavljeno jedrsko zlivanje in projekt fuzijskega reaktorja ITER. Poudarek je predvsem na zasnovi in ciljih projekta fuzijskega reaktorja ter problemih povezanih s tem projektom.

Mentor: **doc. dr. Milan Svetec**

Maribor, november 2010

KAZALO:

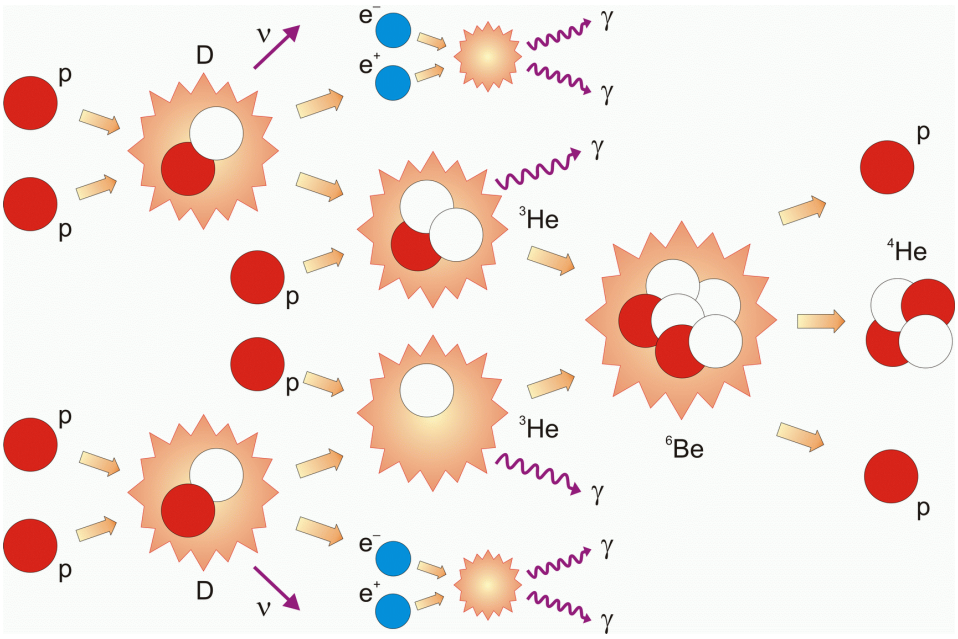
1 UVOD 2
2 JEDRSKO ZLIVANJE 3
2.1 Potrebni pogoji za jedrsko reakcijo 4
2.2 Prednosti in pomanjkljivosti jedrskega zlivanja 5
2.3 Segrevanje plazme 6
2.4 Omejitev plazme 7
3 PROJEKT FUZIJSKEGA REAKTORJA ITER 8
3.1 Časovnica za projekt ITER 10
4 Zaključek 11
Literatura in viri 12

1 UVOD

Rešitev energetskih problemov je ena izmed glavnih prednostnih nalog držav celega sveta. Energetski viri prihodnosti bodo morali zadoščati vedno večjim potrebam, ob čim manjših vplivih na okolje, in omogočati trajnostno prihodnost bodočim generacijam.

Ena izmed alternativ za rešitev energetskih potreb je fuzija. Raziskovati so jo začeli leta 1929, ko so ugotovili, da so vir energije na večini zvezd jedrske reakcije, v katerih sodelujejo lahki elementi. Začela sta Atkinson in Houtermans, ki sta uporabila izmerjene mase lahkih elementov ter z Einsteinovo enačbo $E = mc^2$, ki pove, da je energija E enaka produktu mase *m* in kvadrata svetlobne hitrosti *c*, napovedala, da se lahko pri spajanju majhnih jeder sprostijo velike količine energije. Nadaljeval je Mark Oliphant, ki je leta 1932 odkril helij 3 in tritij, ter interakcijo težkih jeder vodika. Leta 1939 pa je Hans Bethe pokazal kako fuzija napaja zvezde, za kar je leta 1967 dobil Nobelovo nagrado za fiziko.

V središču Sonca se zaradi močne gravitacije in temperatur od 10 do 15 milijonov Kelvinov, vodik pretvarja v helij. Sproščeno energijo Sonce izseva v vesolje. V središču mlade zvezde pa se z naraščanjem temperature najprej pričnejo zlivati protoni, saj drugih jeder ni. Takoj ko nastane dovolj devteronov, se ti zlivajo s protoni. Reakciji potekata praktično vzporedno. Pri višji temperaturi se začnejo zlivati še nastala jedra ${}^{3}_{2}\mathrm{He}_{1}$. V to vodikovo verigo reakcij sodijo še druge reakcije, v katerih sodelujejo jedra ^{7}Be, ^{7}Li, ^{8}B, ^{8}Be. Da pa pridemo pri zlivanju tudi do teh jeder, se morajo najprej vodikova jedra zliti v jedra helija. Naše sonce dobiva energijo s to verigo reakcij in je prikazana na sliki 1 [1].



Slika 1: Prikaz celotne verige reakcij, ki potekajo na zvezdah. V začetku imamo samo protone vodikovih jeder, ki se zlijejo v jedra helija. V to verigo vodikovih reakcij sodijo še druge reakcije, v katerih sodelujejo jedra ^{7}Be, ^{7}Li, ^{8}B, ^{8}Be [1].

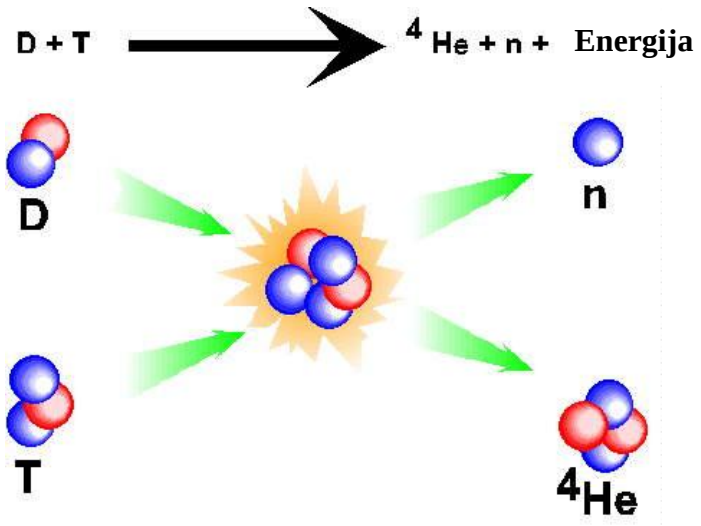
Ob začetku druge svetovne vojne je bilo vsesplošno sprejeto, da zlivanje lahkih jeder predstavlja praktično neizčrpen vir energije. Vzporedno so potekale tudi raziskave cepitev težjih jeder. Pri obeh vrstah procesov so naleteli na močan vir energije, oba pa sta bila žal

najprej izkoriščena v uničevalne namene. V nadaljevanju se bom najprej osredotočil na jedrsko zlivanje, nato pa bom predstavil še projekt fuzijskega reaktorja ITER.

2 JEDRSKO ZLIVANJE

Pri reakciji jedrskega zlivanja oziroma fuzije se sprosti velika količina energije, ko se jedri dveh lahkih atomov, in sicer vodikovih izotopov devterija in tritija, zlijeta in s tem ustvarita težje jedro – helij. Lahko pa se uporabijo tudi reakcije, ki vključujejo samo devterij (D) ali pa devterij (D) in helij (^{3}He).

Jedro vodikovega atoma vsebuje samo en proton. V devteriju jedro vsebuje proton in en nevtron, medtem ko sta pri tritiju dva nevtrona in en proton. Jedrsko zlivanje enega jedra devterija z jedrom tritija ustvari novo jedro elementa helija, nevtron in energijo. Ta postopek je prikazan na sliki 2. Dodatni nevtron lahko uporabimo za generiranje oziroma proizvodnjo še več tritijevega goriva iz litija.



Slika 2: Pri zlivanju devterija (D) in tritija (T) nastaneta jedro helija (He) in nevtron in energija [2]. Sprosti se energija, ki jo dobimo v obliki kinetične energije produktov.

Pri zlivanju dveh devterijev sta možni dve fuzijski reakciji: D + D → He^3 + n + 3,3 MeV in D + D → T + H + 4,0 MeV, kjer D pomeni devterij, T tritij, H proton in n nevtron. Podane energije so celotne sproščene energije na reakcijo.

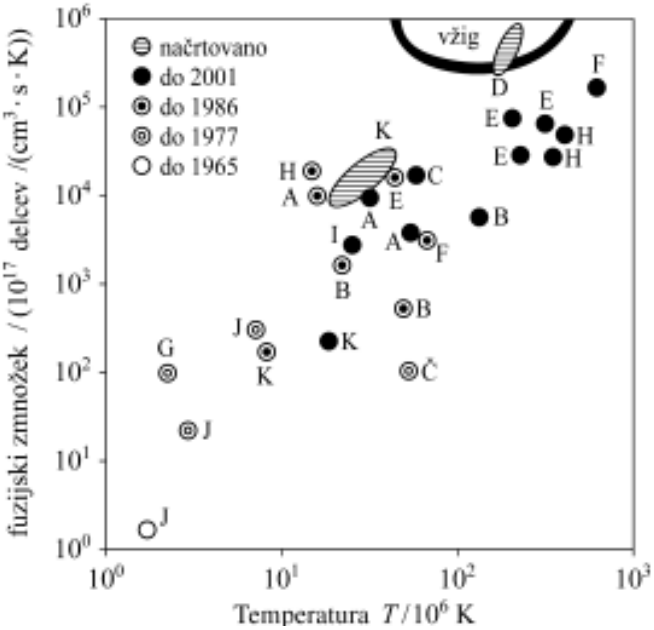
Pri mešanici devterija in tritija se pojavi naslednja reakcija: D + T → He^4 + n + 17,6 MeV, kjer je He^4 helijevo jedro izotopa 4 ali delec α. Pri D-T reakciji je sproščena energija precej večja kot pri D-D reakciji in zato je mešanica D-T primernejša za proizvodnjo energije kot čisti devterij. Zgoraj navedene reakcije potečejo pod določenimi pogoji, ki jih bomo predstavili v nadaljevanju.

2.1 Potrebni pogoji za jedrsko reakcijo

Za dosego pogojev za jedrsko zlivanje v plazmi, ki je zelo vroč plin in vsebuje negativno nabite elektrone in pozitivno nabita jedra, je potrebno močno segrevanje, zato mora biti izguba toplote minimalna. To dosežemo tako, da zadržujemo vročo plazmo termično izolirano od stene reaktorja. Proces je poznan tudi pod imenom omejevanje plazme. Pri raziskavah jedrskega zlivanja sta bili razviti dve različni tehnologiji: magnetno omejevanje in inercijsko omejevanje. Za magnetno omejevanje potrebujemo močna magnetna polja, da zagotovimo termično izolacijo plazme, medtem ko pri inercijskem omejevanju potrebujemo laserje visokih moči ali ionske žarke.

Pri obeh možnostih omejevanja plazme so se raziskave omejile predvsem na razumevanje segrevanja plazme ter njeno zadrževanje. Te raziskave so privedle do rezultatov, ki omogočajo povečanje temperature plazme, gostote jeder v reakciji in čas zadrževanja plazme τ. Bodoči fuzijski reaktorji naj bi proizvedli več energije, kot je potrebujemo za samo vzpostavitev reakcije, kar pa zahteva, da je produkt gostote jeder n pomnožen s časom zadrževanja plazme τ, približno $2 \cdot 10^{20}$ s/m^3. To imenujemo fuzijski zmnožek oziroma Lawsonov parameter. Če plazmo vzdržujemo reda sekunde, potem mora biti gostota jeder reda 10^{20} delcev/m^3. Temperatura plazme pa mora biti med 100 in 200 milijoni kelvinov.

V zadnjih letih in desetletjih je bil opravljen velik skok v razvoju na področju doseganja visokih temperature, gostote delcev in časa omejevanja plazme. Številke so se v zadnjem desetletju približale potrebnim za praktično izvedbo fuzije v reaktorju. Produkt temperature, gostote in časa se je v zadnjih 30 letih povečal za 10^5-krat. Ta produkt je osnova Lawsonovega kriterija. Kako daleč smo prišli je prikazano na sliki 3 [3].



Slika 3: Fuzijski zmnožek v odvisnosti od temperature v določenih časovnih obdobjih za različne eksperimentalne reaktorje [3]. V zgornjem desnem robu je prikazano področje, kjer pride do samodejnega zlitja jeder.

Za ustvarjanje pogojev, kakršni vladajo na Soncu in zvezdah, z namenom pridobivanja energije s fuzijo na Zemlji, je potrebno ustvariti in vzdrževati takšne razmere, da bo

proizvedena energija večja kot energija vložena v sam proces fuzije. Ključni pogoj, da to dosežemo, pa je ustrezna temperatura, saj se jedrska reakcija pojavi samo pri zelo visokih temperaturah. Za reakcijo med devterijem in tritijem je potrebna temperatura preko 100 milijonov Kelvinov, medtem ko so za ostale reakcije potrebne še višje temperature. Ta pogoj so znanstveniki že izpolnili. Seveda nas pa poleg pogojev potrebnih za jedrsko zlivanje zanima tudi, kakšne pa sploh so prednosti in pomanjkljivosti jedrskega zlivanja in to je na kratko predstavljeno v nadaljevanju.

2.2 Prednosti in pomanjkljivosti jedrskega zlivanja

Ena izmed glavnih prednosti jedrskega zlivanja je ta, da imamo na voljo velike zaloge goriva, predvsem devterija, ki ga ni pretežko izločiti iz naravnega vodka. Pri samem procesu ni visoko radioaktivnih odpadkov. Sama tehnologija je razmeroma varna, saj pri napaki pride do hitre zaustavitve reakcije. Količine devterija in tritija v reakcijskem področju so tako majhne, da bi bilo povsem nemogoče, da bi prišlo do večjega nekontroliranega sproščanja energije. V primeru napake oziroma nepravilnega delovanja, bi plazma zadela stene okoliške posode in jih stopila, vendar bi se plazma ohladila. To bi sicer lahko povzročilo milijonske izgube, bistveno pa je, da ne bi prišlo do jedrske katastrofe, kot na primer pri pridobivanju energije z jedrskim razcepom.

Pri fuzijskem pridobivanju energije ni potrebno uporabljati fosilnih goriv, zato tudi produkti, ki jih dobimo, kemično ne onesnažujejo okolja. Prav tako ni onesnaževanja ozračja, ki bi pripeljalo do kislega dežja in toplogrednega efekta.

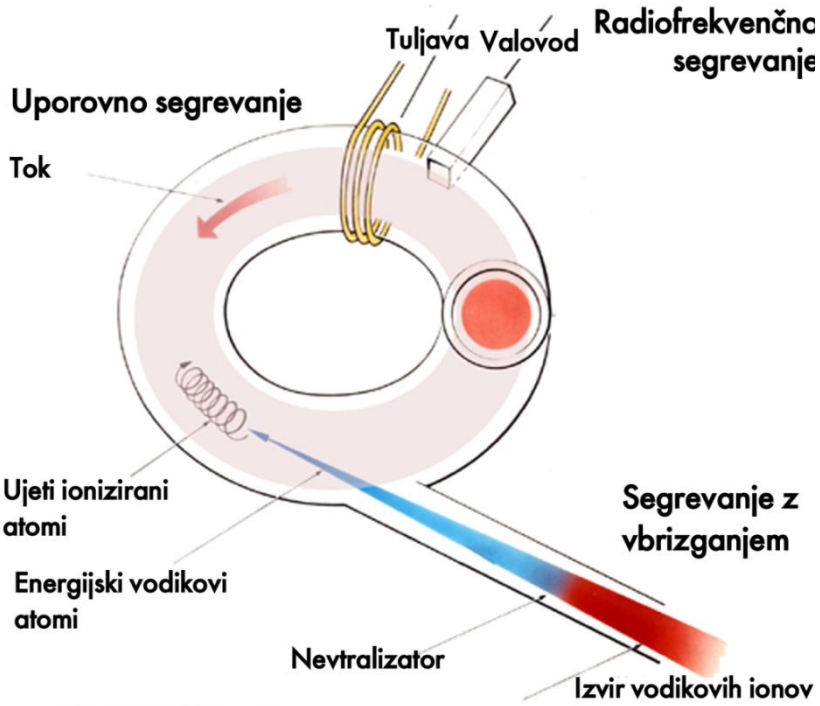
Kar se tiče pomanjkljivosti pa predstavlja glavni tehnološki problem zadrževanje vroče in goste plazme dovolj dolgo, da pride v njej do izdatnega zlivanja. Tu se odpirata dve možnosti. Pri prvi segrejejo plin z električnim tokom do visoke temperature in zadržujejo nastalo plazmo z magnetnim poljem. Plazma je sorazmerno redka, njena gostota je velikostnega reda 10^{19} delcev/m^3. V tem primeru bi plazmo bilo potrebno zadrževati kako sekundo, kar je tehnološko zahtevno. Druga možnost je, da drobne zrnce trdne ali kapljevinske mešanice devterija in tritija z vseh strani obsevamo z močnimi curki laserske svetlobe ali hitrih elektronov. Del snovi s površine odpari, preostalo snov pa segreje in zgosti udarni val, ki potuje proti sredini zrnca. V tem primeru je gostota plazme reda velikosti 10^{28} delcev/m^3, zato zadostuje, če plazmo zadržujemo okoli 10^{-8} s, da pride v zrncu do eksplozivnega zlivanja. Pri tej možnosti so težave pri dovajanju energije zrncu, saj je izkoristek laserjev nizek (od 0,01% do 20%).

Pri jedrskem zlivanju je potrebno upoštevati, da od uspešnega termonuklearnega reaktorja pričakujemo mnogo večjo sproščeno energijo, kot je dovedena energija. Devterija, ki bi ga rabil takšen reaktor, je v naravi dovolj, vendar pa radioaktivnega tritija v naravi ni v velikih količinah in ga bo potrebno pridobivati v samem reaktorju iz litija. Žal pa so zaloge litijevega lažjega izotopa precej omejene [4]. Reakciji, pri katerih pridobivamo tritij iz litija, sta naslednji: ${}_0^1n_1 + {}_3^6Li_3 \Rightarrow {}_1^3H_2 + {}_2^4He_2$ in ${}_0^1n_1 + {}_3^7Li_4 \Rightarrow {}_1^3H_2 + {}_2^4He_2 + {}_0^1n_1$. Da pa sploh lahko pričnemo z uporabo jedrskega zlivanja, moramo plazmo najprej segreti na ustrezno temperaturo in načini segrevanja so predstavljeni v nadaljevanju.

2.3 Segrevanje plazme

Plazma je električni prevodnik, zato jo je mogoče segrevati tako, da skoznjo pošljemo električni tok. To imenujemo ohmsko ali uporovno segrevanje. Podoben način poznamo pri žarnicah in električnih grelcih.

Toplota, ki jo dovedemo plazmi z električnim tokom, je odvisna od upornosti plazme in toka, ki teče skoznjo. Vendar pa z naraščanjem temperature v plazmi pada upornost plazme, zato postane tovrstno segrevanje manj učinkovito. Znano je, da je najvišja temperatura plazme, ki jo segrevamo ohmsko, približno 20 do 30 milijonov K [1]. Za doseganje višjih temperatur pa ta način ni učinkovit. Zato uporabimo še druge načine segrevanja plazme kot so injiciranje visokoenergetskih atomov, magnetna kompresija in radiofrekvenčno segrevanje. Vsi ti različni načini segrevanja plazme so prikazani na sliki 4. Šele z njihovo kombinacijo lahko dosežemo ustrezno temperaturo, potrebno za reakcijo med devterijem in tritijem [1].



Slika 4: Različni načini segrevanja plazme [1]: uporovno segrevanje, segrevanje z vbrizgavanjem in radiofrekvenčno segrevanje. Šele s kombinacijo teh načinov segrevanja ter magnetne kompresije dosežemo ustrezno temperaturo, potrebno za fuzijo.

Metoda injiciranja visokoenergetskih atomov se uporablja kot dopolnilna metoda segrevanja k ohmskemu segrevanju. Visokoenergetske (nevtralne) atome injiciramo v ohmsko že segreto, plazmo. Atomi se takoj ionizirajo in so ujeti v magnetno polje. Nato visokoenergijski ioni s ponavljajočimi trki prenesejo del energije delcem v plazmi, kar povzroči dvig temperature v plazmi.

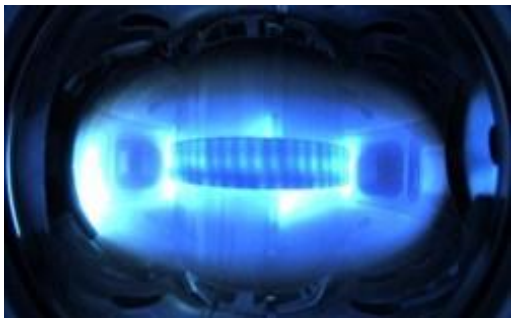
Naslednji način segrevanja plazme je radio-frekvenčno segrevanje, kjer uporabimo visoko frekvenčne valove, ki jih generiramo izven same naprave. Če imajo le-ti pravo frekvenco, lahko svojo energijo predajo nabitim delcem v plazmi, delci pa nato s trki preostalim delcem, kar povzroči segrevanje celotne plazme.

Dodatno lahko plin segrejemo tudi z nenadnim stiskanjem. Povsem enako povečamo temperaturo plazme, če jo v zaporednih sunkih stisnemo s povečanim magnetnim poljem, ki plazmo obdaja. V sistemu tokamak je to stiskanje oziroma kompresija dosežena enostavneje in sicer s pomikom plazme v področje z večjim magnetnim poljem. Zaradi kompresije plazme se ioni bolj približajo drug drugemu, kar pa je le še dodatna prednost, saj s tem povečamo gostoto plazme. Šele s kombinacijo vseh načinov segrevanja dosežemo ustrezno temperaturo, vendar moramo to plazmo pri teh temperaturah tudi omejiti v določenem področju in o tem bo govora v nadaljevanju.

2.4 Omejitev plazme

Temperature, ki jih je potrebno doseči za jedrsko zlivanje, so sicer visoke, vendar dosegljive. Problem predstavlja zadrževanje devterija in tritija pri tako ekstremnih pogojih, vendar prav ti pogoji z visokimi temperaturami omogočajo del rešitve, saj se pri teh temperaturah vsi elektroni ločijo od jedra, kar imenujemo ionizacija.

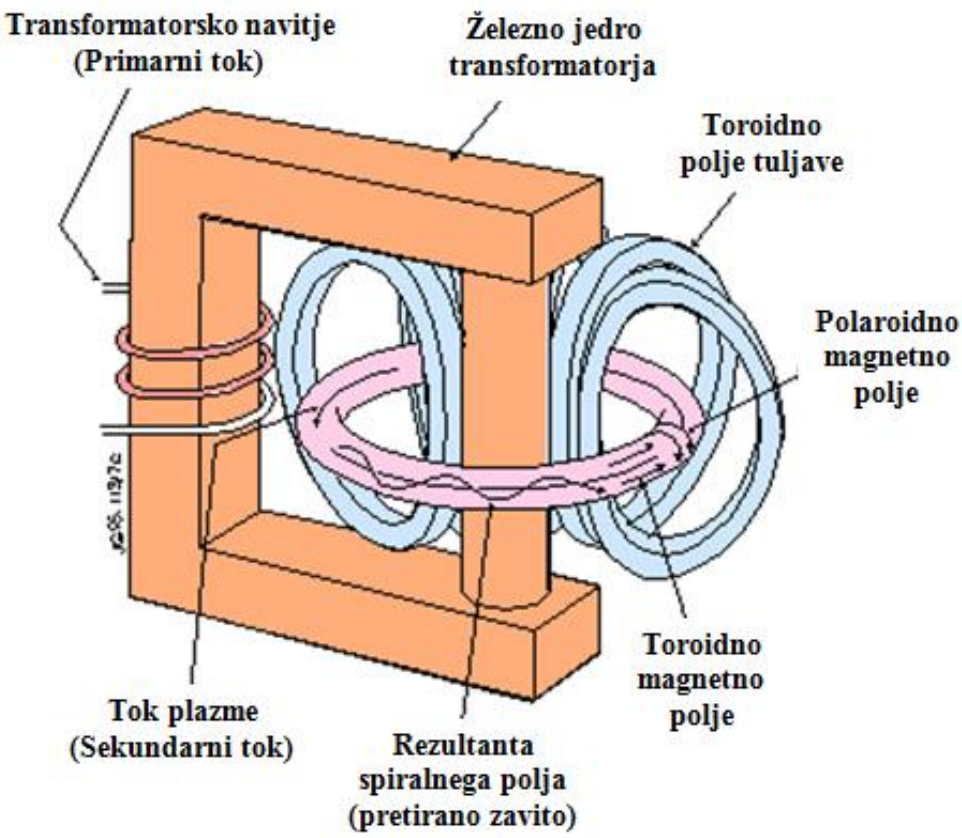
Ne obstaja material, iz katerega bi lahko izdelali stene posode, v kateri bi bila plazma s temperaturo nekaj milijonov stopinj. Plazma bi poškodovala posodo ali pa bi posoda ohladila plazmo. Zaradi električnega naboja, ki ga imajo elektroni in jedra, je plazmo mogoče zadrževati z magnetnim poljem, kot nam kaže slika 5. Z magnetnim poljem prisilimo delce, da se gibljejo spiralno okoli silnic, ki jih določa magnetno polje.



Slika 5: Magnetno omejena plazma v Korejskem tokamaku KSTAR. Visokotemperaturna plazma seva v spektru, ki ga naše oko ne zazna. Kar je vidno na sliki, so hladna področja na zunanjem robu plazme [5].

Najobetavnejša in tudi najbolj raziskana naprava za magnetno omejitev plazme je tokamak. Trenutno največji tokamak na svetu je JET in sicer v Culhamu v Veliki Britaniji (CCFE - Culham Centre for Fusion Energy) [6]. Shemo lahko vidimo na sliki 6. Glavni komponenti magnetnega omejevanja sistema tokamak sta zunanje toroidno polje, ki obkroža vakuumsko posodo, in poloidno polje, ki ga ustvari tok v plazmi. Plazemski tok pa je induciran s transformatorskega navitja.

Do sedaj smo na kratko pogledali, kaj je to jedrska fuzija in kateri so potrebni pogoji za jedrsko zlivanje. Omenili smo tudi, kakšne so prednosti in slabosti le-tega. V nadaljevanju pa bom predstavil projekt fuzijskega reaktorja ITER, v katerem sodelujejo države iz vsega sveta in ki bi naj omogočil bolj zanesljivo oskrbo z električno energijo.



Slika 6: Shematski diagram tokamaka [2]. Najpomembnejše je toroidno magnetno polje. Poloidno magnetno polje je nekajkrat manjše in ga ustvari tok plazme [7]. Toroidne tuljave so pomembne predvsem za pozicioniranje plazme. Ker so ohmske izgube zaradi tokov v tuljavah prevelike, uporabljajo superprevodnike. Tok skozi toroidno in poloidno tuljavo ustvari poloidno magnetno polje z gostoto B_p in toroidno z gostoto B_φ [2].

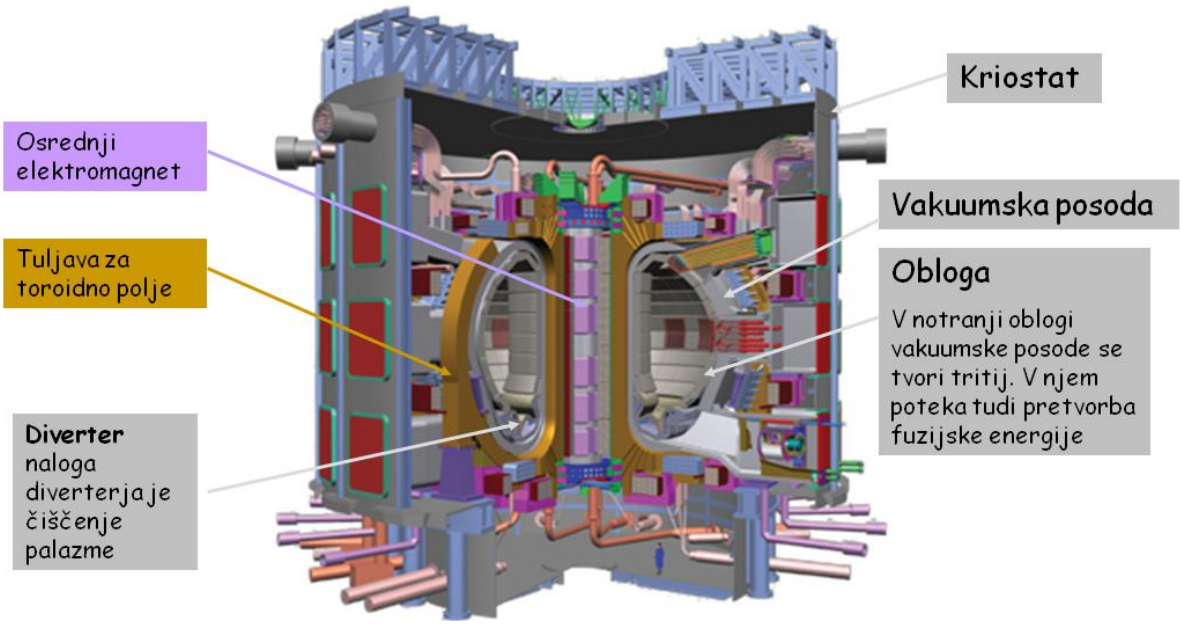
3 PROJEKT FUZIJSKEGA REAKTORJA ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) je skupen mednarodni projekt, katerega namen je demonstracija znanstvenih in tehnoloških zmožnosti energije fuzije. Partnerji v projektu so EU, Japonska, Kitajska, Indija, Južna Koreja, Rusija in ZDA. ITER bo zgrajen v Evropi v Cadarachu v južni Franciji. Namen ITER-ja, in s tem tudi dolgoročni cilj raziskovanja fuzije, je izkoriščanje jedrske energije, pridobljene s fuzijo lahkih atomov. Prav tako je namen pridobiti potrebne podatke za izvedbo in obratovanje prve delujoče proizvodne enote.

Pri ITER-ju bodo znanstveniki proučevali plazmo in pogoje, podobne tistim, ki jih pričakujemo pri proizvodnji elektrike v fuzijski elektrarni. Elektrarna bo proizvajala desetkrat več energije, kot je potrebujemo za vzdrževanje plazme na ustrezni temperaturi. To bo prvi fuzijski eksperiment, ki bo proizvedel neto energijo. Prav tako bodo testirali večje število ključnih postopkov, ki bodo potrebni pri dejanski fuzijski elektrarni vključno s segrevanjem, kontrolo, diagnostiko in oddaljenim vzdrževanjem.

Stroški izgradnje ITER-ja so za prvo fazo ocenjeni na približno 5 milijard € ter nadaljnjih

5 milijard € za obdobje 20 let delovanja. Prispevki posameznih članic ITER-ja bodo v glavnem komponente, ki jih bodo gradile za reaktor [1]. Glavne komponente reaktorja so kriostat, osrednji elektromagnet, tuljava za toroidno polje in diverter, katerega naloga je čiščenje plazme. Posamezne komponente so prikazane na sliki 7. Ves tokamak obdaja termično zaščitena celica. To je vakuumska posoda, ki predvsem služi toplotni zaščiti superprevodnih magnetov ter posledično kot še ena vakuumska zaščita poleg notranje vakuumske posode. Ima tudi vlogo pri radiološki zaščiti pred hitrimi nevtroni. Medtem ko zunanja vakuumska posoda ščiti predvsem pred konvekcijskim prevajanjem toplote, je notranja vakuumska posoda predvsem zaščita pred sevalnim prenosom toplote. Zunanja posoda (kriostat) je zgrajena iz nerjavečega jekla. Obdaja notranjo vakuumsko posodo in superprevodne magnete, in je shlajena na 80 K [7].



Slika 7: Zgradba reaktorja tokamak [2]

Čeprav je ITER eksperimentalni projekt, so stroški in dimenzije reaktorja impozantni. Reaktor bo postavljen na 40 ha zemljišča, dodatno je rezerviranih še 30 ha. Za delovanje potrebuje hladilno vodo za 450 MW odvedene toplote in elektrarno za 120 MW električne energije. Nekaj tehničnih podatkov o reaktorju je podanih v tabeli 1.

Višina:	24 m
Širina:	30 m
Polmer obroča plazme:	od 2,0 m do 6,2 m
Volumen plazme:	837 m^3
Fuzijska (toplotna) moč:	od 400 MW do 500 MW
Električni tok v plazmi:	15 MA
Razmerje: odvedena/dovedena moč:	od 5 do 10

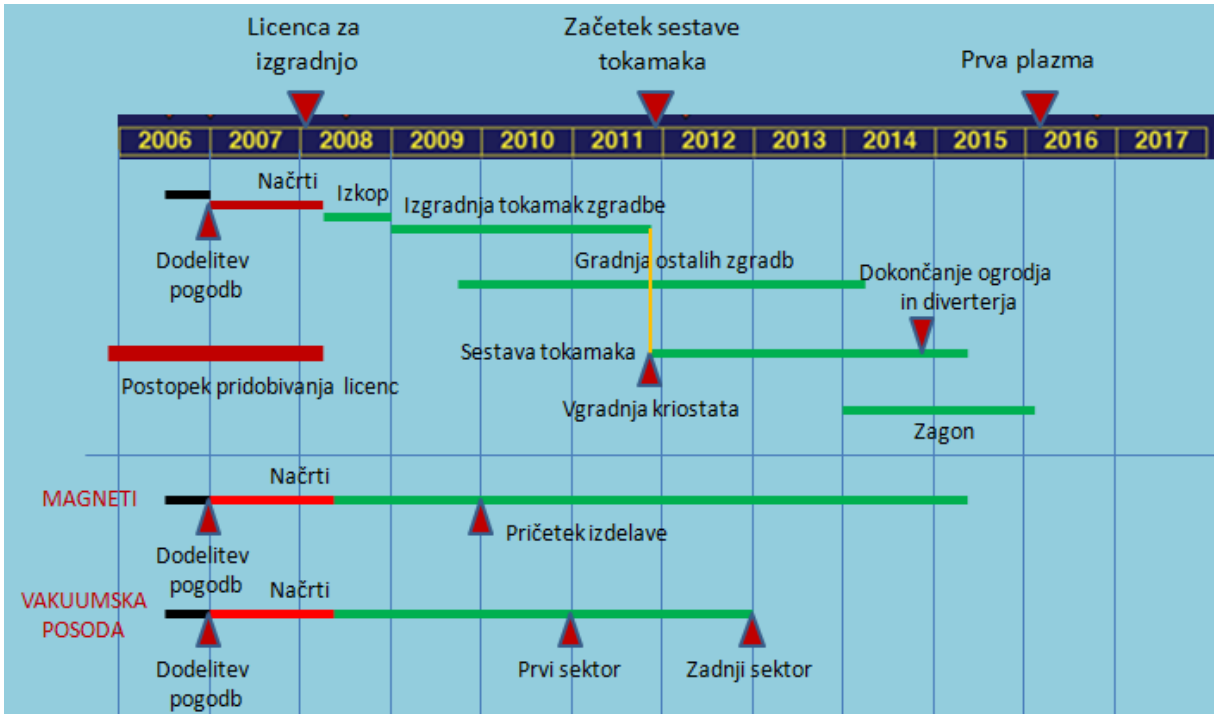
Tabela 1: Nekaj tehničnih podatkov tokamaka [8]

Sevanje tritija pri spajanju jeder v fuzijskem reaktorju je v primerjavi s fisijskimi jedrskimi reaktorji majhno, jedrski odpadki pa so precej manj nevarni kot so pri fisijskem reaktorju. Pri fuziji se namreč spajajo lahka jedra, zato nimamo dolgoživih jedrskih odpadkov. Projekt

ITER naj bi končno realiziral težko pričakovano samodejno reakcijo zlitja jeder vodika v jedro helija. Prvo samodejno delovanje reaktorja se pričakuje leta 2016. Če bo ITER izpolnil pričakovanja strokovnjakov, potem bo problem energije za človeštvo rešen.

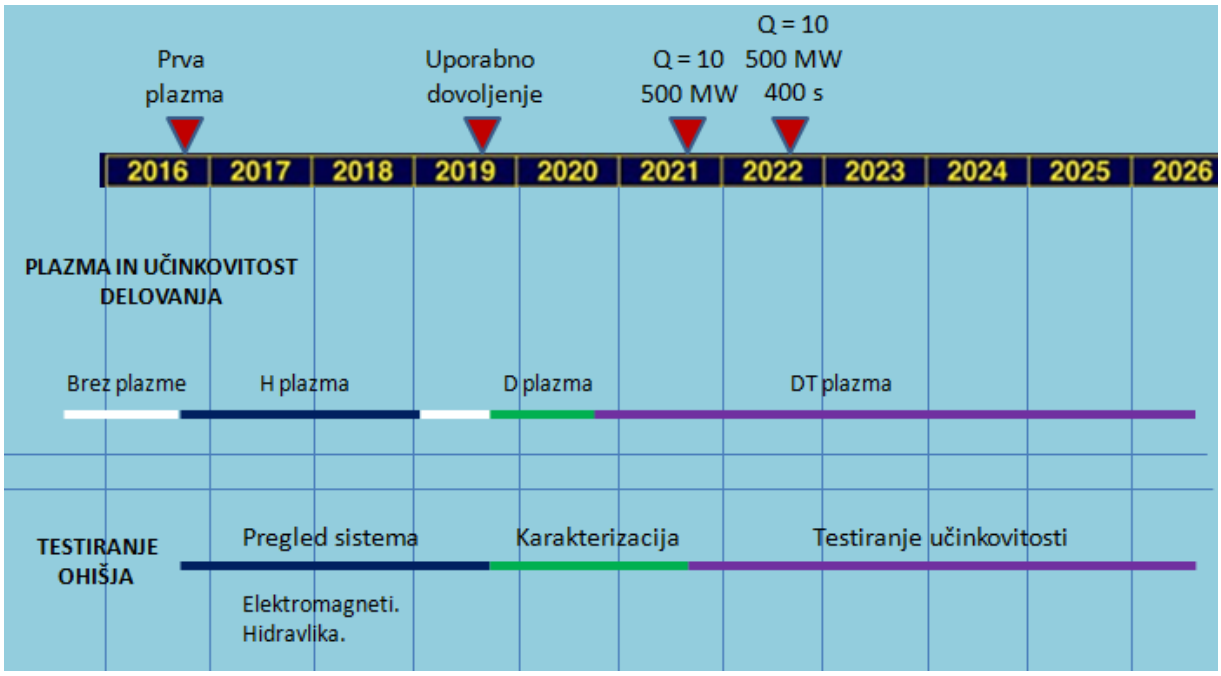
3.1 Časovnica za projekt ITER

Po vedno bolj podrobnih razvojnih stopnjah je bil načrt, oziroma model ITER-ja, za potencialne bodoče partnerje uspešno zaključen leta 2001 in se je kasneje osredotočil na razpravo o razdelitvi stroškov za izgradnjo. Na sliki 8 je podrobno prikazana časovna razdelitev izgradnje ITER-ja.



Slika 8: Prikazana je podrobna časovna razdelitev izgradnje od same zasnove projekta do zagona reaktorja in njegovega testiranja. Povzeto po [2].

V splošnem se pričakuje, da bo ITER deloval 20 let in samo delovanje je razdeljeno na pet glavnih faz, kot je prikazano na sliki 9. Najprej sledi integracija zagona in ta operacija zaključuje izgradnjo ITER-ja z zagotovilom, da vsi sistemi medsebojno delujejo in vključuje pripravo naprave za doseganje prve vodikove plazme. Ta faza omogoča popoln zagon tokamak sistema v nejedrskem okolju brez odvisnosti od polnega daljinskega vodenja. Leta 2020 pa sledi še zadnja faza in sicer DT plazma in samo testiranje sposobnosti jedrskega reaktorja.



Slika 9: Delovanje in testiranje ITER-ja je razdeljeno v pet faz in tri faze testiranja ogrodja, od začetne kontrole sistema, do testiranja učinkovitosti [2].

4 Zaključek

Ob sedanjem trendu naraščanja svetovnega prebivalstva in s tem tudi potreb po energiji je pridobivanje energije z jedrskim zlivanjem ena izmed rešitev za energijsko neodvisnost za bodoče generacije. Princip delovanja in tehnologija za uspešno izgradnjo in zagon eksperimentalnega reaktorja je znana, vendar bo potrebno še precej vložiti v izboljšavo tehnologije, daljinskega vodenja in drugih tehnologij za uspešno dokončanje projekta. Čeprav bo pot od eksperimentalnega reaktorja ITER, preko demonstracijskega reaktorja, do polno funkcionalnega reaktorja precej dolga, je v načrtu, da bo le-ta uspešno zagnan še v prvi polovici tega stoletja.

Literatura in viri

[1] Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo, pridobljeno 30.10.2010 iz http://www.icjt.org/

[2] Iter – the way to the new energy, pridobljeno 30.10.2010 iz http://www.iter.org/

[3] N. Hudej, *Družbene posledice jedrske fuzije* (Diplomsko delo, Fakulteta za družbene vede, Univerza v Ljubljani, 2007).

[4] M. Bevec, *Fuzija – zlivanje jeder* (Seminarska naloga, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 2002).

[5] Fusion Energy, pridobljeno 31.10.2010 iz http://www.efda.org/fusion_energy/index.htm

[6] The Joint European Torus (JET) – Europe's largest Fusion Device, pridobljeno 31.10.2010 iz http://www.jet.efda.org/

[7] J. Maglica, *Projekt ITER* (Seminarska naloga, Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani, 2005).

[8] D. Jezeršek, *Fusion – the materials science challenge* (Predstavitev, Mednarodna podiplomska šola Jožefa Štefana, 2007).