

# ITER

Avtor:  
Miha Škof  
Mentor:  
doc. dr. P. Zihel

Fakulteta za matematiko in fiziko  
2. 6. 2009

# Kazalo

Uvod .....	3
Fuzija .....	3
Gravitacijsko zaprtje .....	4
Inertno zaprtje .....	4
Magnetno zaprtje .....	5
Prednosti fuzijske energije .....	6
Gorivni cikel .....	6
Gretje plazme .....	7
Sistem za radiofrekvenčno gretje .....	7
Sistem za gretje z nevtralnimi žarki .....	8
Cilji .....	8
Sestavljanje .....	9
Sestavni deli .....	10
Magneti .....	11
Vakuumska posoda .....	12
Prevleke .....	12
Divertor .....	13
Line .....	13
Diagnostika plazme .....	14
Kriostat .....	14
Hlajenje .....	14
Krio obrat .....	14
Dobava energije .....	14
Sistem za odvajanje toplote .....	15
Nadzorni sistem .....	15
Varnost .....	15
Tveganja .....	15
Nesreče .....	16
Odpadki .....	16
Zaključek .....	17
Literatura .....	17

## Uvod

Prebivalstvo se bo v tem stoletju močno povečalo. Najbolj se bo povečal delež prebivalstva v državah v razvoju. S porastom teh prebivalcev bodo narasle potrebe po energiji, predvsem električni. Trenutno največ potreb po energiji zadostimo s fosilnimi gorivi. S tem tempom porabe je teh na voljo le še za nekaj generacij. Čim večje bo njihovo pomanjkanje, tem večja bo njihova cena. Izključeni niso niti politični konflikti. Spremljajoči problem s toplogrednimi plini je znan vsem. Odraža se na že občutnih klimatskih spremembah. Škoda, prizadejana okolju, ni zanemarljiva. Kot alternativa se postavljajo obnovljivi viri energije. Z njimi bi proizvajali okolju prijaznejšo energijo. Žal je njihov potencial odvisen od geografske lege in nenadnih vremenskih sprememb. Zaradi tega z njimi ne moremo proizvesti ogromnih količin energije in ne morejo biti nosilci pokrivanja čedalje večjih energijskih potreb. Poiskati je potrebno nov, vsem dostopen vir energije in to bi lahko bila fuzija [1].

ITER (Internacional Termonuclear Experimental Reactor) je do sedaj največji projekt, ki se ukvarja s preučevanjem fuzije. Njegov namen je preučiti lastnosti fuzije do te mere, da bi lahko zgradili eksperimentalno fuzijsko elektrarno. S tem ciljem v mislih pri projektu skupaj sodelujejo: EU, Japonska, ZDA, Rusija, Koreja, Kitajska in Indija. Reaktor bodo postavili na jugu Francije v mestu Cadarache. Podobno kot nekateri drugi fizikalni projekti, je imel tudi ta težave s predsodki javnosti. Ti so se nanašali predvsem na besedo termonuklearen, ki ni bila pozitivno sprejeta. Iter v latinščini pomeni pot, kar je sedaj novi uradni pomen kratice [1].

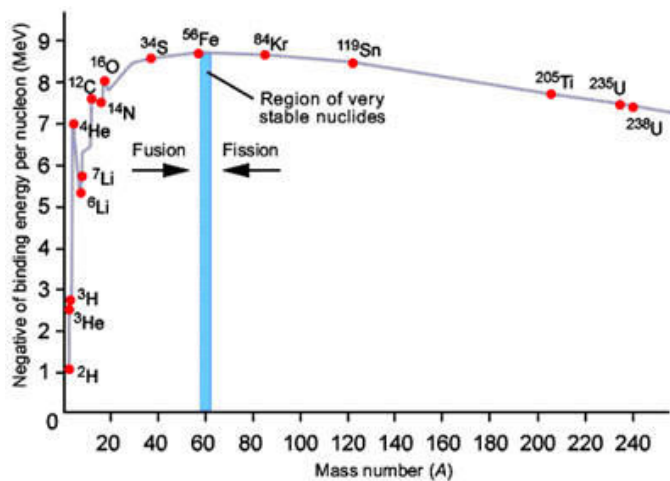
## Fuzija

Je proces spajanja jeder. Za elemente z vrstnim številom, manjšim od železa, je proces eksotermen in za tiste z večjim endotermen (slika 1).

Pri spojitvi dveh lahkih jeder nastane tretje, čigar masa je manjša kot vsota mas reaktantov. Razlika mas se sprosti v obliki energije v skladu z enačbo

$$E = mc^2. \quad (1)$$

Dve jedri se zaradi pozitivnega naboja protonov odbijata. Čim večji je naboj atomov, tem večji je njihov coulombski odboj in tem bolj jih moramo segreti za potek reakcije, zato v fuzijskih reakcijah prevladuje vodik in njegovi izotopi. Energijska bariera za gorivo, ki vsebuje devterij in tritij, znaša 0,01 MeV. Če jedri pospešimo, lahko presežeta ta odboj in se približata na razdaljo, na kateri prične delovati privlačna jedrska sila. Ta je močnejša od elektromagnetne in jedri se spojita. Ob tem sprostita več energije, kot je bilo potrebno za njuno združitve. To načeloma omogoča izvedbo samovzdržne reakcije. Energijo za preseg energijske bariere najlažje dovedemo s segretjem atomov. Po izračunih ustrezna temperatura znaša 120 milijonov kelvinov. Z doseganjem te temperature znatno presežemo ionizacijsko energijo vodika, ki znaša 13,6 eV, zaradi česar se elektroni ločijo od jeder. Nastalo snov imenujemo plazma in predstavlja četrto agregatno stanje. Končna temperatura plazme bo nižja od izračunane zaradi dveh pojavov. Pri tej temperaturi bi lahko že jedro s povprečno energijo plazme premostilo energijsko bariero. Za potek reakcije zadostuje, če energijsko



Slika 1: Graf vezavnih energij jeder v periodnem sistemu. Kadar preidemo od manj vezanega jedra k bolj vezanemu, se sprosti energija. Za jedra z vrstnim številom nižjim od 26 (železo) to dosežemo s fuzijo in za tista z višjim s fisijo. Zanimiva je primerjava v količini sproščene energije med  $^{235}\text{U}$  in  $^{210}\text{Pb}$ , ki jo izkoriščajo jedrske elektrarne, ter tisto med  $^2\text{H}$  /  $^3\text{H}$  in  $^4\text{He}$ , ki jo bodo izkoriščale fuzijske elektrarne [4].

bariero presežejo le jedra z najvišjimi energijami v plazmi. Drugi je tunelski pojav. Jedra imajo lahko manj energije, kot jo zahteva energijska bariera, a vseeno skozi tunelirajo. Z nižjo temperaturo je nižja tudi pogostost fuzijskih reakcij [2, 3].

Da bo v plazmi prišlo do fuzije, mora imeti poleg zadostne temperature tudi zadostno koncentracijo reaktantov oziroma delcev plazme. Njena gostota ne sme biti premajhna, moramo jo ograditi. Govorimo o zaprtju plazme. Predstavili bomo osnovne tri načine zaprtja plazme.

## Gravitacijsko zaprtje

V tem primeru plazmo skupaj drži gravitacija. Za nastanek gravitacije potrebujemo velikanske mase, zaradi česar ta način zaprtja opazimo le pri zvezdah. Umetno takega načina zaprtja ne znamo ustvariti in posledično nima praktične uporabe [3].

## Inertno zaprtje

Devterij in tritij sta zmešana v gorivo v obliki kroglic. Kroglice morajo biti enake velikosti. Njihova masa je v razponu od  $\mu\text{g}$  do  $\text{mg}$  odvisno od posamezne izvedbe. Vsako posamezno kroglico vstavijo v reakcijsko komoro. V njej jo z vseh strani osvetlijo z laserji. Zaradi dovedene toplote zunanja plast kroglice eksplodira. Udarni valovi potujejo proti notranjosti kroglice in jo stisnejo. Pravimo, da nastane implozija. Posledično gostota v notranjosti močno naraste. Jedro kroglice se vžge in sproži fuzijsko reakcijo [5].

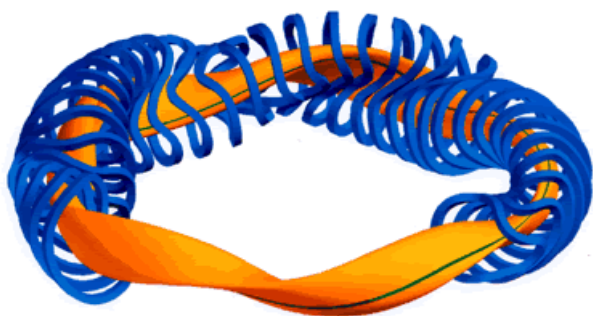
Princip delovanja je enak kot pri vodikovi bombi, le da so tu mnogo manjše mase reaktantov in da tu reakcijo sprožimo z laserji namesto s fuzijsko bombo. Največ pozornosti je bilo temu področju namenjeno ravno v povezavi z izdelavo vodikovih bomb [5].

Ta način zaprtja spremlja še precej težav. Na prvem mestu je razvoj dovolj močnih laserjev, sledi ustvarjanje simetričnih kroglic in simetrične implozije, preprečiti je potrebno prezgodnje segrevanje goriva... Če vse te težave rešimo, za uporabo v elektrarni ostane še ena poglobljena: naenkrat lahko implodiramo le eno kroglico [5].

## Magnetno zaprtje

Je najbolj raziskano in ima največji potencial za praktično uporabo. Izrablja naboj delcev v plazmi, ki jih manipuliramo z magnetnimi polji. Najpreprostejša izvedba je ravna cev, okoli katere je v obliki vijačnice navitje magnetnega polja. Na obeh koncih sta magnetni ogledali, ki delce odbijata nazaj v cev. Čeprav so uporabili dodatna magnetna polja, idealnih magnetnih ogledal niso mogli ustvariti. Nekaj plazme je vedno pobegnilo. Ker je tritij kot najpogostejše fuzijsko gorivo radioaktiven, je bilo to nesprejemljivo in so ta način zaprtja opustili [6].

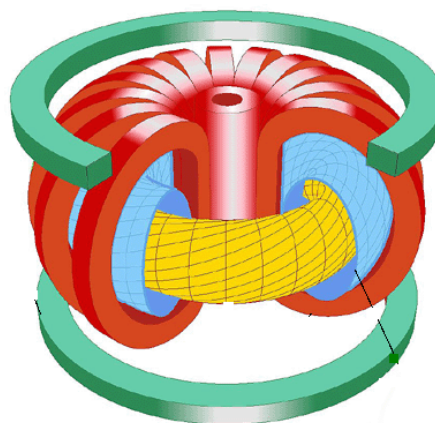
Problem so rešili tako, da so prosta konca staknili skupaj. Plazma je sedaj ujeta v torusu, ki je lahko sestavljen na dva načina. V novejšem načinu so magnetna polja postavljena tako, da se plazma v njem vrtinči. Njeno tirnico si najlažje predstavljamo kot zaporedje Möbiusovih trakov. Napravo s tem načinom zaprtja imenujemo stelarator (slika 2). Z njo bo lažje nadzorovati plazmo kot s sorodnimi napravami, a je izjemno zahtevna za izdelavo [6, 7].



**Slika 2:** Stelarator je novejša različica magnetnega zaprtja. V njem plazmo vrtinčimo, zaradi česar jo lažje nadzorujemo. Glavna ovira pri njegovem razvoju je izjemna tehnična zahtevnost [8].

V ITER bodo uporabili magnetno zaprtje na principu tokamaka (slika 3). To je naprava toroidne oblike z več vrstami magnetnih navitij. Če uporabimo le eno navitje kot pri ravni cevi, ne moremo dovolj dobro zadrževati plazme v radialni smeri. Njegova glavna prednost je, da lahko skozi plazmo poženemo tok, s čimer okoli nje ustvarimo še dodatno magnetno polje, ki omogoča boljše zaprtje. Zaradi upornosti plazme ta tok skrbi tudi za njeno segrevanje [6, 9].

Doseganje zadostnega zaprtja je glavni problem fuzijskih reaktorjev. Začne se pri postavitvi magnetnih polj. Če ta niso idealno postavljena, se lahko zgodi, da se dve polji med seboj izničita. Ustvarila bi se vrzel, skozi katero bi plazma uhajala. Za še večji problem se je izkazala turbulenca v plazmi, zaradi katere slednja prav tako uhaja. Plazma, ki uide iz magnetnega zaprtja, zaradi visoke temperature poškoduje notranjost reaktorja. Ob stiku nastanejo opilki materiala, ki se vmešajo v plazemsko gorivo in znižajo njegovo temperaturo. Notranjost reaktorja bo zaradi takih nezgod potrebno večkrat zamenjati. Tokamaki trenutno dosegajo najboljše rezultate zaprtja, čeprav naj bi jih v prihodnosti izpodrinili stelaratorji, ki ne potrebujejo plazemskega toka [6, 9].



**Slika 3:** Z rumeno je označena plazma v tokamaku, ki jo ograjujejo magnetna polja. Z rdečo in zeleno so označena njihova navitja ter z modro vakuumska posoda. Prednost tokamaka je, da lahko skozi plazmo poženemo tok, ki ustvari še dodatno magnetno polje. Je lažji za izdelavo v primerjavi s stelaratorjem, a še vedno zelo zahteven [10].

## Prednosti fuzijske energije

Fuzijsko energijo pogosto označujejo kot energijo prihodnosti. Je to le zato, ker jo bodo razvili v prihodnosti ali bo resnično pripomogla k dobrobiti človeštva? Slabost ima le eno – tehnično zahtevnost. Kaj pa prednosti?

- Bo praktično neomejen vir energije. Obe glavni gorivi se nahajata v velikih količinah po celotnem planetu. Devterij je najlažje pridobiti iz morske vode, litij je dostopen v zemeljski skorji [1, 2].
- Ne proizvaja toplogrednih plinov. V gorivnem ciklu ne nastaja CO<sub>2</sub> ali kateri koli drugi plin, ki negativno vpliva na okolje [2].
- Je primerna za proizvodnjo večjih količin energije. Zadostila bo naraščajočim potrebam po elektriki v večjih mestih. Ena elektrarna bo lahko oskrbovala dva milijona gospodinjstev [1, 2].
- Ne proizvaja odpadkov, ki bi predstavljali dolgoročno breme za okolje. Radioaktivni bodo postali le deli najbližje plazmi. Teh ni veliko, imajo majhno prostornino in jih bo po sto letih moč ponovno uporabiti [1].
- Ne bo potrebovala vsakodnevnega rokovanja in dostavljanja radioaktivnih snovi [1].
- Fuzijski reaktor je inherentno varen. V vsakem trenutku bosta v njem le dva grama goriva, kar zadostuje le za nekaj sekund gorenja plazme. Verižna reakcija ni možna in zatorej reaktor ne more uiti nadzoru [1, 2].

## Gorivni cikel

V ITER bodo izvajali sledečo reakcijo med devterijem (D) in tritijem (T):



Devterijev masni delež znaša 0,015 %. Zaradi velike relativne razlike mas je ločitev izotopov dokaj enostavna in je v naravi dosegljiv v izobilju. Tritij je radioaktiven z razpolovnim časom  $t_{1/2} = 12,3$  let [11]. Za potrebe reakcije ga je potrebno ustvariti. Najbolj obetavna sta sledeča načina:



Začetni nevtron nastane v reakciji (2). Reakcija (3) je eksotermna, a porabi nevtron za razliko od reakcije (4), ki je endotermna in ne porabi nevtrona. Za vzdrževanje reakcije bo nujnih nekaj reakcij (4). Začetni načrti predvidevajo naravno mešanico litijevih izotopov, ki jo sestavlja 7,5 % <sup>6</sup>Li in 92,5 % <sup>7</sup>Li [12]. Iskanje idealne mešanice bo predmet raziskav. Litij se v naravi nahaja v izobilju. Pri poskusih ustvarjanja somovzdržne reakcije bo v obliki plošč nameščen na rob vakuumске posode. V začetnih fazah raziskav bodo tritij v reakcijsko zmes vnašali iz zunanjih virov [2].

Reakcijo spremljajo sledeči očitki [2]:

- Proizvaja znatno količino nevtronov, kar ustvarja radioaktivnost znotraj reaktorja.
- 80 % energije prevzamejo nevtroni, kar omejuje nadaljnjo pretvorbo energije.
- Odvisna je od litija, ki se nahaja v manjšem izobilju kot devterij. (Njegova količina vseeno zadošča za več tisoč let.)
- Zahteva rokovanje z radioaktivnim tritijem, ki ga je podobno kot vodik težko zadržati in lahko uide iz reaktorja. Radioaktivni izpusti bi lahko bili znatni.

Čeprav je zgornja reakcija favorizirana, lahko v fazi raziskovanja pride v poštev tudi kaka druga. Med verjetnejšimi je reakcija med dvema devterijema:



Obe reakciji nastajata z enako verjetnostjo. Njeni prednosti sta neodvisnost od količine litija in nižja koncentracija radioaktivnega tritija. Slabosti so višja začetna temperatura, večji razpon poškodb na vakuumski posodi in 68-krat slabša proizvodnja energije (pri enakem tlaku in prostornini) [2].

## Gretje plazme

Za gretje plazme v tokamaku bodo uporabljali več sistemov: elektronski ciklotronski, ionski ciklotronski, hibridni in sistem s pospešenimi nevtralnimi žarki. Sprva sta načrtovana dva nevtralna žarka, katerima se naknadno lahko doda še en. Radiofrekvenčni sistem je sestavljen tako, da bodo lahko preizkusili več načinov delovanja ionskega in elektronskega ciklotronskega sistema. Skupna grelna moč lahko doseže 110 MW [1, 13].

### Sistem za radiofrekvenčno gretje

Vsi taki sistemi so narejeni po enakih principih. Nameščeni so v ekvatorialne line, ki jih varujejo pred sevanjem. Prožilci valov so postavljeni v njihovem zadnjem delu v podaljšku v vakuumsko posodo. S termičnega vidika delujejo enako kot obdajajoče prevleke.

V razvoju so trije programi, ki so v različnih fazah razvoja. Cilj prvega je ustvariti neprekinjen val s frekvenco 170 GHz, močjo 1 MW in izkoristkom 50 % [1, 13]. Izkoristek 50 % pomeni, da se bo polovica moči vala porabila za segrevanje plazme. Najboljši dosedanja rezultat je 20 s trajajoč signal moči 0,9 MW in izkoristkom 43 %. Pri nižjih močeh jim je uspelo ustvariti stabilne neprekinjene valove z izkoristki nad 50 %. V splošnem temu programu manjka še veliko razvojnega dela, preden bo zadostil potrebam ITER.

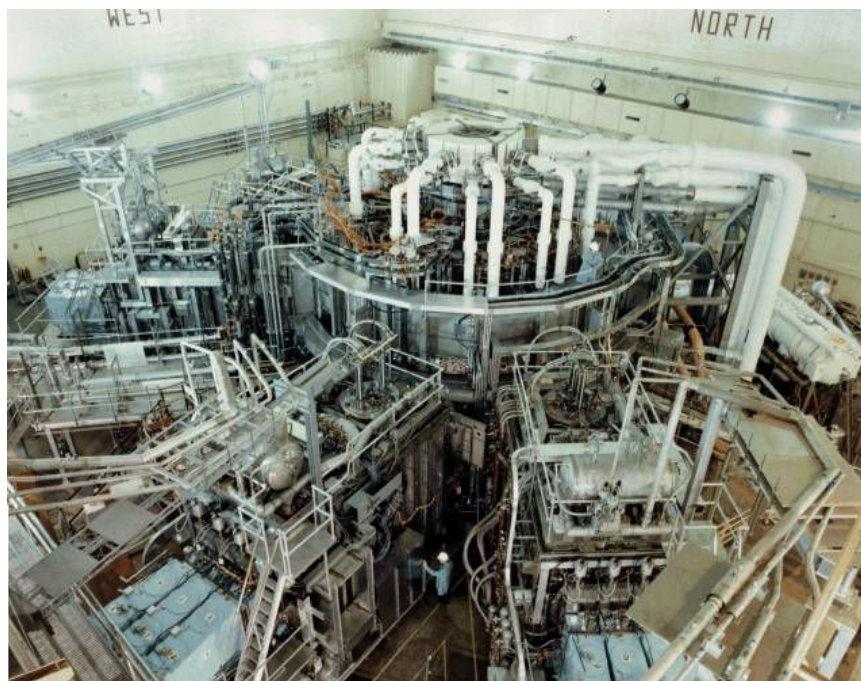
Z drugim programom bodo ustvarili neprekinjen val v frekvenčnem območju med 40 MHz in 60 MHz z močjo 2 MW [1, 13]. Posebnih zahtev za izkoristke ni zaslediti. Program je že izvedljiv, vendar ga razvijajo dalje, da bi postal cenovno ugodnejši.

Zadnji program mora ustvariti neprekinjen val s frekvenco 5 GHz in močjo 1 MW [1, 13]. Zanj bodo uporabili klistrone. Študij o njem še ni narejenih.

## Sistem za gretje z nevtralnimi žarki

V plazmo bodo vbrizgavali nevtralne devterijeve atome energije 1 MeV [1]. S trki s plazmo ji predajajo energijo, kar se odraža na dvigu temperature. Sprva so atomi nevtralni, a se ob stiku z ioni v plazmi ionizirajo, nastanejo ioni D<sup>+</sup>. Ti imajo naboj in so zato ujeti v magnetnem polju. Okoliška plazma, od katere so še vedno hitrejši, jih zavira, kar se ponovno odraža na dvigu temperature. Za ta prenos energije je potrebno zagotoviti konstantna magnetna polja, sicer hitri ioni pobegnejo iz plazme pred predajo energije [14].

Vbrizgalnik (slika 4) bo lahko neprekinjeno obratoval do ene ure. Poleg gretja doprinese tudi k rotaciji plazme. Taki vbrizgalniki polovične moči se že uporabljajo.



Slika 4: Poskusni reaktor z vbrizgalniki na Princeton Plasma Physics Laboratory [15].

## Cilji

ITER je prvi dovolj velik reaktor, da bodo v njem lahko sprožili samovzdržno fuzijsko reakcijo. V njem želijo preučiti obnašanje plazme do te mere, da bi jo lahko komercialno izrabljali. V ta namen so si zadali naslednje cilje [16]:

- Doseči gorenje plazme z energijskim pomnoževanjem  $Q \geq 10$ .
- Doseči enakomerno gorenje plazme z energijskim pomnoževanjem  $Q \geq 5$ .
- Vzdrževati fuzijsko reakcijo vsaj 8 minut.
- Vžgati gorečo samovzdržno plazmo.
- Razviti potrebno tehnologijo in postopke za obratovanje fuzijske elektrarne.
- Preveriti koncepte tritijevega razplojevanja.
- Izboljšati tehnologijo pretvarjanja energije od hitrih nevtronov.



Faktor energijskega pomnoževanja  $Q$  je definiran kot razmerje med močjo, ki jo dobimo iz fuzijske reakcije, in močjo, potrebno za segretje plazme

$$Q = P_{\text{fuzije}} / P_{\text{gretje plazme}} \quad (7)$$

Do sedaj jim še v nobenem eksperimentu ni uspelo doseči faktorja  $Q \geq 1$ . Faktor  $Q = 10$  bo za komercialno uporabo premajhen. Pri tem energijskem povečanju se komaj pokrijejo energijske potrebe celotnega reaktorskega obrata. V komercialnih fuzijskih elektrarnah bo faktor energijskega povečanja znašal med 40 in 50 [7, 17].

## Sestavljanje

Za raziskave in razvoj je namenjenih 650 milijonov dolarjev. Vsi stroški v tridesetletnem obratovanju so ocenjeni na 7,6 milijarde dolarjev. Konstrukcijske dele, ki jih bo potrebno kupiti ali narediti, delimo na tri skupine. V prvi skupini so elementi, ki jih bo priskrbela država gostiteljica. Med nje sodijo izgradnja prostorov, preskrba z gradbeno opremo in delovno silo... V drugo spadajo elementi, ki s tehničnega vidika niso tako zanimivi. Stroške zanj si bodo vse strani delile enakomerno. Dogovarjajo se za ustanovitev skupnega sklada v ta namen. V tretji so visoko tehnološki elementi. Zanimivi so za vse sodelujoče. Da bi vsi dobili svoj delež, so se v naprej dogovorili, katera stran bo kaj prispevala. Za enakomerno porazdelitev stroškov so vse projekte ovrednotili, a končna cena projekta ne bo vedno sovpadala z ocenjeno. Viške stroškov mora vsaka stran poravnati sama. Stroški gradnje predstavljajo polovico vseh izdatkov. Tabela 1 prikazuje njihovo porazdelitev po sestavnih delih [1].

Načrti za ITER so bili dokončani leta 2001. Sledilo je dogovarjanje sodelujočih strani o delitvi stroškov. Novembra 2006 je bila ustanovljena organizacija ITER Organisation, ki bo

Sestavni del	Delež stroškov [%]	v imenu sodelujočih zgradila in si lastila
TF navitja	10	ITER. Prvi eksperimenti v reaktorju bodo
PF in CS navitja	4	mogoči desetletje po njeni ustanovitvi.
Nb <sub>3</sub> Sn prevodniki	10	Večina projekta je zasnovana na
NbTi prevodniki	3	osnovi že preverjenih tehničnih rešitev. Še
kriostat in toplotni ščiti	4	vedno lahko pride do neljubih presenečenj,
krio obrat in distribucija	3	saj tako velikega fuzijskega reaktorja
dobava energije	7	človeštvo še ni gradilo. Kjer je le možno, so
vakuumska posoda	8	načrti zasnovani tako, da omogočajo
prevleke	6	naknadne spremembe, če se bodo
divertor	3	realne razmere izkazale za drugačne kot
sistemi za gretje plazme	7	teoretične. Največ pozornosti je namenjeno
hladilna voda	5	razvoju velikih superprevodnih magnetov za
oprema za daljinsko		
rokovanje	2	
diagnostika	4	
popravila strojev	3	
nadzor in zbiranje podatkov	2	
vakuumske črpalke	1	
sistem za oplojevanje tritija	1	
zgradbe	14	

**Tabela 1: Prikazana je porazdelitev stroškov. Največji zalogaj predstavljajo potrebne zgradbe, kar ni presenetljivo. Od sestavnih delov so najdražja magnetna navitja in superprevodni materiali zanje, sledita jim vakuumska posoda in sistemi za gretje plazme [1].**

močna polja, velikega kriogenega sistema, komponent, odpornih na visoke energijske gostote, sistema za razplod in rokovanje s tritijem, sistema za gretje plazme in robotike za daljinsko rokovanje. Nizke tolerance za izdelavo predstavljajo še dodaten izziv [1].

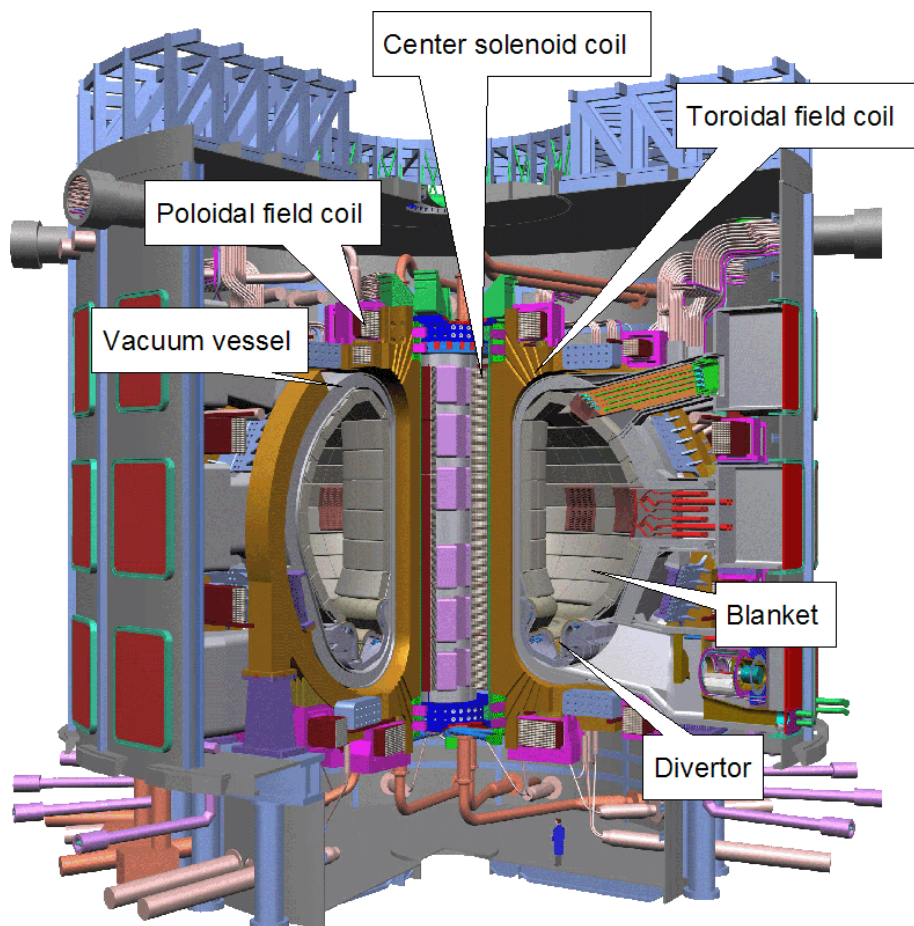
Pogosto se postavlja vprašanje, ali bi ITER lahko bil manjši. Tabela 2 prikazuje njegove osnovne mere. Zmanjšanje njegovih mer bi drastično zmanjšalo njegove stroške. Z manjšimi merami naprave ne bi mogli doseči energijskega pomnoževanja  $Q \geq 10$ , kar je eden izmed ciljev projekta. Večja velikost objekta prav tako omogoča preizkus več načinov obratovanja. V daljni prihodnosti lahko zato pričakujemo le še večje fuzijske reaktorje.

višina	24 m
premer	30 m
maksimalni radij plazme	6,2 m
minimalni radij plazme	2,0 m
volumen plazme	840 m <sup>3</sup>
plazemski tok	15,0 MA
magnetno polje v osi	5,3 T
površina vakuumske posode	678 m <sup>3</sup>
površina preseka	21,9 m <sup>2</sup>

Tabela 2: Osnovne mere ITER [1, 5].

## Sestavni deli

Najprej bomo predstavili sestavne dele tokamaka (slika 5) in nato sestavne dele preostalega obrata.



Slika 5: Skica tokamaka v ITER. Zunanje stene sestavljajo kriostat. Znotraj njega je vakuumna posoda (Vacuum vessel). Na njenih zunanjih robovih so nameščena magnetna navitja za torusno polje (Toroidal field coil), poloidalno polje (Poloidal field coil) in centralno solenoidno polje (Center solenoid coil) Rdeči kvadri na zunanji steni so line, ki omogočajo dostop do notranjosti vakuumne posode. Po njeni notranjosti so nameščene prevleke (Blanket) in na njenem dnu divertor (Divertor) [18].

## Magneti

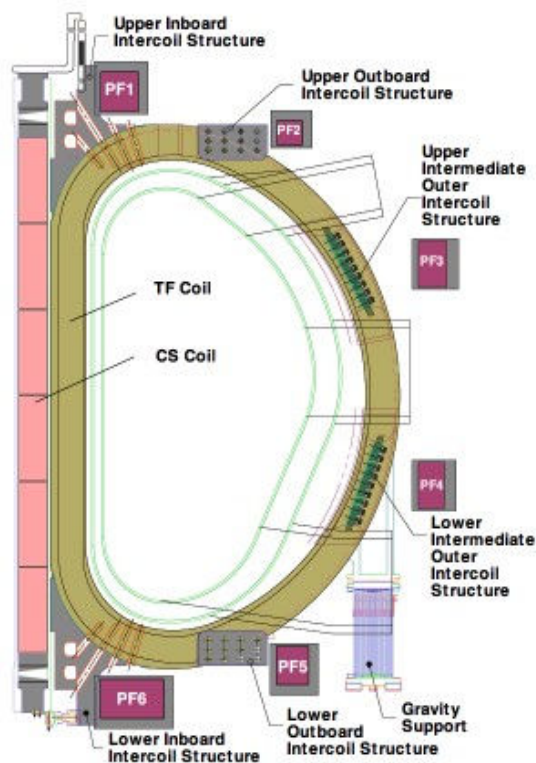
Vsi bodo narejeni iz superprevodnega Nb<sub>3</sub>Sn. V ta namen je potrebno iznajti postopke za njegovo masovno in kvalitetno proizvodnjo. Sestavljajo jih (slika 6) [1, 13]:

- 18 navitij za torusno polje (TF),
- 6 navitij za poloidalno polje (PF),
- centralno navitje za solenoidno polje (CS),
- korekcijska navitja in
- sorodne strukture.

Magnete združijo v skupen sestav, kar olajša iskanje elektromagnetnega ravnovesja. Ko so aktivirani, TF navitja z ravnimi deli pritisnejo skupaj in tvorijo obok. Vsa navitja so zaprta za dodatno oporo. PF navitja so narejena s presežkom ovojev, da bi se izognili potrebi po zamenjavi v primeru lokalne poškodbe. Na TF navitja ustvarjajo navor, zaradi česar so med njimi potrebne ojačitvene strukture [1, 13].

CS navitje leži v sredi tokamaka in je valjaste oblike. Sestavljeno iz dveh modulov, enega vložnega v drugega. Zunanji modul bo meril 12 m v višino in 4 m v zunanjem premeru. Za notranjega ni podatkov. Skupaj bosta tehtala 840 t. Za boljšo kontrolo nad obliko vhodne plazme bo razdeljeno na šest neodvisnih delov [1, 13].

TF navitje je v obliki črke D. Je visoko 14 m, široko 9 m in eno tehta 290 t. Za hlajenje bo v njem 1100 žic premera 0,7 mm zvitih skupaj v tulec premera 4 cm, ki bo tvoril vodnik dolžine 840 m. Po njem se bo pretakal tekoči helij, ki bo hladil žice [1, 13].



Slika 6: Prikazan je presek tokamaka, na katerem so poudarjena magnetna navitja. V notranjosti bo centralno solenoidno (CS) navitje, katerega se bo dotikalo 18 torusnih navitij (TF) v obliki črke D. Po zunanji strani bo razporejenih 6 navitij za poloidalno polje (PF) [1].

## Vakuumska posoda

Njene funkcije so absorbiranje nevtronov na nivo, sprejemljiv za magnete, okoliško opremo in po zaustavitvi za osebje, zagotavljanje visokega vakuumu za delovanje plazme, odstranjevanje helija in ostalih nečistoč iz plazme, dostop za segrevanje plazme, diagnostiko in testiranje prevlek, opora za namestitvev prevlek in divertorja, odstranjevanje zapoznele toplote ter prva linija obrambe v primeru izpusta radioaktivnih snovi [1, 13].

Radialno je razdeljena na devet enakih delov, ki jih bodo med sestavljanjem privarili na centralno ploskev. Sestavljena je iz dveh školjk iz nerjavečega jekla skupne debeline od 0,3 m do 0,8 m. Vmesni prostor med školjkama bo zapolnjen z vodo in ščiti pred nevtroni. Del materiala na notranji strani, obrnjenega proti plazmi, je feromagnetnega, da zmanjša prepletanje magnetnih polj in posledično število ujetih delcev plazme [1, 13].

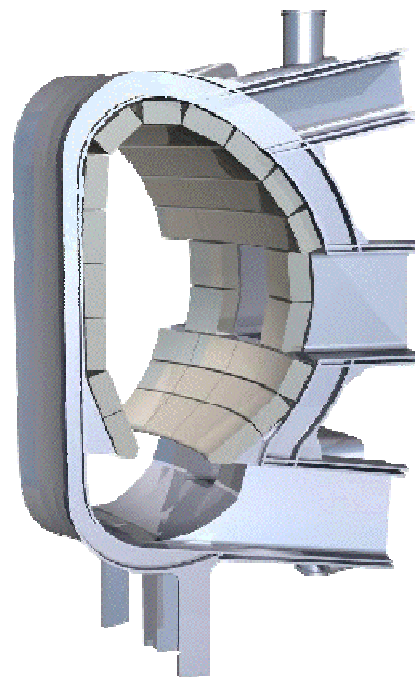
Izdelava tako velikega in tankega dela je izziv. Tolerance pri izdelavi so velike le 0,5 mm. Potrebno je vedeti, kje bodo prisotni nastavki za prevleke in zvari navitij magnetnih polj [1, 13].

## Prevleke

Sprva bo njihova funkcija le varovanje pred sevanjem in nato še produkcija tritija. 440 prevlek (slika 7) je preko nastavkov ločeno nameščenih na notranjo stran vakuumske posode. Za kompenzacijo toplotnih raztezkov so nastavki fleksibilni v transverzalni smeri in togi v radialni. S strani obrnjene proti plazmi si sledijo berilijev ščit, pritrjen na bakreno podlogo, ki je dalje nameščen na vodno hlajeno jekleno podporo.

Ob popravilih bo potrebno zamenjati le notranje sloje prevlek, kar zmanjšuje količino končnih odpadkov. Za vzdrževanje bodo uporabljali daljinsko vodeno vozilo, ki bo nameščeno na tire. Eno vozilo bi lahko opravljalo vzdrževalna dela po celotnem tokamaku, a bodo raje namestili dve, vsako za svojo polovico tokamaka. V vakuumsko posodo ju bodo vstavili skozi line. Za to so predvidene štiri ekvatorialne line, razporejene simetrično okoli tokamaka. Vozilo mora biti sposobno rokovanja s 4 t težko prevleko na razdalji 8 m z natančnostjo 1 mm v omejenem prostoru tokamaka. Postopki za menjavo delov morajo biti pripravljene do potankosti, zato jih bodo uporabili že med sestavljanjem. Operaterji se bodo tako navadili delati z vzdrževalnim vozilom, dokler bo dostop v notranjost tokamaka še vedno mogoč [1, 13].

Življenjska doba posamezne prevleke ni določena. Če ne prej, bo njihova menjava potrebna ob namestitvi litijevih plošč za produkcijo tritija. Po ocenah bo za menjavo ene prevleke potrebnih 25 dni ali 9 mesecev za vse [1, 13].



**Slika 7: Na notranjo stran vakuumske posode bodo namestili prevleke, ki bodo sprva le ščitile pred sevanjem. Kasneje jih bodo nadomestili z litijevimi prevlekami, ki bodo služile produkciji tritija [1].**

## Divertor

Črpa energijski tok s plazme in iz nje izloča nečistoče. Mednje spadajo He jedra in snovi, nastale ob stiku plazme s stenami tokamaka. Nahaja se proti dnu vakuumske posode in ga sestavlja 54 modulov oziroma kaset. Tak model omogoča natančno mehansko podporo in spremembe postavitev komponent znotraj vakuumske posode. Za 20 s zdržijo obremenitve toplotnega toka velikosti  $20 \text{ MW/m}^2$ , čeprav bodo realni toplotni toki med  $5 \text{ MW/m}^2$  in  $10 \text{ MW/m}^2$  [1, 13].

Življenjski čas teh delov je zaradi velikih toplotnih obremenitev težko napovedati. Med obratovanjem jih bo potrebno večkrat zamenjati. Načrtovane so tri popolne zamenjave v prvih desetih letih in dve kasneje. Vzdrževanju so namenjene tri line, ki vodijo do divertorja. Preko vsake line se bo vzdrževalo 18 kaset. Kaseto bo v tokamak skozi lino vstavil kasetni multifunkcijski premikač in jo postavil na tire. Dalje jo bo na pravo pozicijo premaknil kasetni toroidni premikač. Na poziciji, določeni na  $\pm 10 \text{ mm}$  natančno, jo bo spustil in pritrdil. Eno okvarjeno kaseto sedaj zamenjamo v manj kot dveh mesecih in celoten divertor v šestih. Postopke vzdrževanja in menjave še razvijajo, saj bo potrebnih menjav lahko znatno več. Čas, potreben za menjavo ene kasete, želijo zato znižati na osem tednov in čas za menjavo celotnega divertorja na manj kot šest mesecev. Poleg namestitve kaset bo potrebno poskrbeti še za povezavo vodnih tokokrogov in namestitvev električne napeljave [1, 13].

## Line

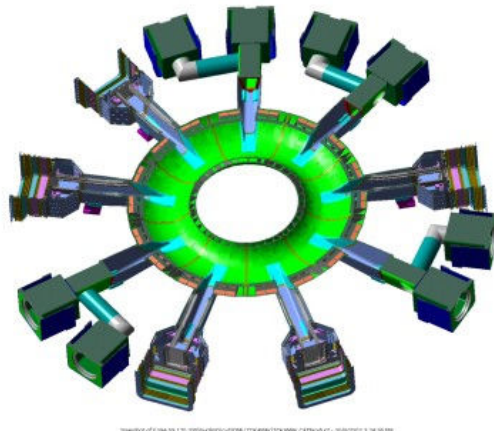
Omogočajo glavni dostop do plazme. V ekvatorialnem nivoju jih je 17 in bodo porabljene za naslednje funkcije [1]:

- antena za radio frekvenčno gretje (3 line),
- vod za nevtralne žarke (2 lini sprva, kasneje možne 3),
- višek lin (2 lini),
- testni moduli prevlek (3 line),
- diagnostika plazme (6 lin le zanjo, nameščena bo tudi v druge line) in
- daljinsko rokovanje (2 lini si deli z diagnostiko in 2 z odvečnima linama).

Devet lin bo vodilo do divertorja (slika 8). V njih bo nameščenih osem krio črpalk, diagnostika, čistilni sistem, sistem za vbrizgavanje plina in ogled notranjosti vakuumske posode. Tri izmed njih bodo uporabljene za menjavo kaset, ki jih bodo po vstavitvi pripeli na tračnice [1, 13].

18 lin bo nad ekvatorialnim nivojem. Namenjene so diagnostiki in za tok elektronov, ki bo uravnaval nestabilnosti v plazmi.

Vse line so načrtovane tako, da bo njihova zamenjava hitra in enostavna ter bodo po popravilih lahko ponovno uporabljene [1, 13].



**Slika 8: Prikazanih je devet lin do divertorja. V njih bo osem kriočrpalk, diagnostika, sistemi za čiščenje, vbrizgavanje goriva in menjavo kaset v divertorju. Zaradi različnih funkcij se med seboj razlikujejo po zgradbi. Podvržene bodo visokim obremenitvam, zaradi česar so narejene tako, da jih bo možno zamenjati [1].**

## Diagnostika plazme

Deli se na tri kategorije:

- za osnovni nadzor in zaščito naprave,
- za potrebe nadzora naprednega delovanja in
- za potrebe fizikalnih raziskav.

Vanjo je vključenih preko 40 sistemov, opremljenih s senzorji v linah in večini ostalih dostopnih mest, kjer se lahko opazuje plazmo. Sistemi so združeni v sedem večjih skupin: magnetna, nevtronska, optična, bolometrična, spektroskopska, mikrovalovna in za komponente v potencialnem stiku s plazmo [1, 13].

## Kriostat

Je enoslojni cilindar višine 24 m in premera 28m, ki obdaja jedro. Namenjen je ščititvi pred radioaktivnim sevanjem, zato da bo lahko osebje doseglo line. Ob zaustavitvah reaktorja bo mogoče izvesti popravila v prostoru med jedrom in kriostatom. Za preprečitev prevajanja toplote na magnetna navitja bodo med temi in vakuumsko posodo nameščeni še toplotni ščiti [1].

## Hlajenje

Tokamak je vodno hlajen preko ločenih vodotokov. Trije so vzporedno nameščeni v prevleko, en v divertor in dva vzporedno v vakuumsko posodo. En sam vodotok v vakuumski posodi zadošča za odstranitev vse zapoznele toplote nastale po zaustavitvi reaktorja. Tipična začetna temperatura vode je 100°C, njen tlak bo v mejah od 3 MPa do 4,2 Mpa. Končna temperatura bo med 200°C in 240°C [1].

Naslednji sestavi predstavljajo sestavne dele obrata kot celote in niso deli tokamaka.

## Krio obrat

Zajema obrat za tekoči dušik in helij ter sistema za njuno shranjevanje in distribucijo. Največji zalogaj predstavlja hlajenje magnetov na temperaturo tekočega helija. Na 80 K so ohlajeni toplotni ščiti. Za primer dogodkov, v katerih bi se helij uparil, je v shranjevalnem sistemu nameščen balon za njegovo zajetje [1]. Celotni obrat je zasnovan tako, da omogoča nadgradnjo med razvojem ITER.

## Dobava energije

Med obratovanjem bo ITER stalno potreboval 120 MW električne energije. Poleg tega bo potreboval še dodatne pulze energije, kadar bodo želeli vzpostaviti tok skozi plazmo in jo segreti. Ti nanesejo še potrebo po dodatnih 210 MW energije [1].



## **Sistem za odvajanje toplote**

Glavni hladilni sistem tokamaka in preostali viri toplote bodo odvečno toploto sproščali v atmosfero preko standardnih hladilnih stolpov [1].

## **Nadzorni sistem**

Vsebuje glavni nadzorni sistem, ki je nadrejen vsem podsistemskim nadzornim sistemom. Vsebuje operacijski nadzorni sistem za nadzor plazme, sistem za shranjevanje podatkov in sinhronizacijski sistem. Vzporedno deluje neodvisni speti sistem, ki varuje pred nedovoljenim dostopom in dejanji [1].

## **Varnost**

Pri oceni varnosti naprave je smiselno preučiti njene učinke na zaposlene in na okolje z javnostjo vred. Za prve je vzpostavljen program za zaščito osebja pred tveganji, navzočimi med gradnjo, obratovanjem in vzdrževanjem. Mišljena je zaščita pred radioaktivnostjo in konvencionalnimi tveganji. Cilj programa je upoštevati varnost osebja pri konstruiranju sistemov, sestavnih delov in vzdrževalnih postopkov. S tem bi dosegli največjo varnost zaposlenih. Zavezali so se načelu ALARA (as low as reasonably achievable), ki teži k čim večjemu zmanjšanju izpostavljenosti radioaktivnim dozam. Te bodo nižje, kot narekujejo smernice [1, 2].

Posledice delovanja ITER na okolico in javnost lahko razdelimo na tri sklope: tveganja, ki jih lahko predvidimo že sedaj, nesreče in ravnanje z nastalimi odpadki.

## **Tveganja**

Sam fuzijski proces ne predstavlja večje nevarnosti zaradi nizke razpoložljive gostote moči v reaktorju. Tveganja se navezujejo na tritij in radioaktivni prah, ki bo nastal znotraj vakuumske posode zaradi trkanja nevtronov ob stene.

Po načrtih bo ITER skozi vso svojo življenjsko dobo pokuril 16 kg tritija. V začetni fazi raziskav ga bo dostavljal zunanji dobavitelj. Predpisi omejujejo velikost največje možne pošiljke, zato bo potrebna vsak teden nova. Dogovarjajo se za spremembo predpisov, da bi zmanjšali pogostost pošiljk in tveganja povezana z njimi. Shranjenega bodo lahko imeli največ 3 kg. Maksimalna količina tritija, vpletenega v kakršno koli nesrečo, ne more preseči 450 g [1, 2].

Radioaktivni prah nastane iz materialov znotraj vakuumske posode in predstavljajo nevarnost le med razgradnjo. Načrtovane omejitve predpisujejo nastanek le 100 kg kovinskega prahu (volfram, baker, jeklo), 100 kg berilijevega prahu in 200 kg ogljikovega prahu. Ta prah bi ob puščanju hladilnega sistema lahko reagiral s paro, s čimer bi nastal eksplozivni vodik. Na vročih površinah se zato lahko nabere le 6 kg vsake vrste prahu [1, 2].

V kolikor bi prišlo do puščanja radioaktivnih snovi iz vakuumske posode, jih zadržijo kriostat in niše ali v skrajnem primeru prezračevalni sistem objekta [1, 2].

## Nesreče

Med obratovanjem bo v reaktorju en gram goriva na kubični meter. Če v danem trenutku prekinemo dotok goriva, se reakcija ne more več samovzdrževati in se prekine, čemur sledi samodejna ohladitev plazme. Reakcija tako ne more uiti nadzoru [7]. Poudariti velja, da za razliko od fisijskih reaktorjev v fuzijskem ne bo zaloge goriva za daljše obdobje.

Narejene so bile študije potencialnih nesreč. Med najhujšimi in najverjetnejšimi so [1]:

- prehodni pojavi zaradi negotove fizike plazme,
- padec toka hladilne tekočine znotraj vakuumske posode,
- popolna odpoved hladilnega sistema znotraj vakuumske posode,
- puščanje hladilnega sistema zunaj vakuumske posode,
- napaka na dostopu vakuumske posode na linah in
- kratek stik na magnetnem navitju.

Rezultati študij kažejo, da v nobenem od zgornjih primerov izpostavljenost javnosti ne bo mnogo večja od izpostavljenosti naravnemu sevanju. Četudi bi se zgodilo več okvar hkrati, ne presežemo mejne doze izpostavljenosti, pri kateri bi morali evakuirati prebivalce. Evakuacija javnosti in zaposlenih je tako izključena kot ukrep v sili [1].

## Odpadki

Radioaktivni odpadki, nastali med obratovanjem, ki bodo ostali po končnem zaprtju projekta, vključujejo aktivirane materiale zaradi fuzijskih nevtronov, kontaminirane materiale, aktivirane korozijske produkte in tritij. Z dekontaminacijo bo možna ponovna uporaba aktiviranih materialov. V ta namen razvijajo materiale z nizko aktivacijsko energijo, kar bo ta proces pospešilo. Po načrtih bo ponovna uporaba istih materialov možna v 50 do 100 letih po končni zaustavitvi. V tem času naj bi njihovi aktivacijski nivoji padli na raven, na kateri za njih ne bo potrebnega dodatnega nadzora po merilih IAEA. Materiali, ki po 100 letih ne bodo ustrezali tem merilom, bodo označeni kot odpadki in bodo morali biti shranjeni v dolgoročnih odlagališčih. Ob končni zaustavitvi bo v ITER 30.000 t radioaktivnih odpadkov, od katerih se jih bo 80 % lahko ponovno uporabilo [1, 2].

Prednost fuzijskih radioaktivnih odpadkov se kaže v njihovi manjši ekvivalentni dozi v primerjavi z odpadki iz jedrskih elektrarn in termoelektrarn. Ekvivalentna doza ne šteje zgolj števila radioaktivnih razpadov, temveč upošteva tudi njihovo biološko škodljivost. Sprva imajo odpadki iz ITER največjo škodljivost za okolje, a ta hitro pada zaradi njihovih kratkih razpolovnih časov. Izrabljeno gorivo iz nukleark in pepel iz termoelektrarn vsebujejo  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  z vsemi njihovimi potomci in  $^{40}\text{K}$ , ki imajo večinoma razpolovne čase daljše od milijona let. Slednji tako dalj časa predstavljajo grožnjo za okolje in je z njimi težje ravnati. K lažjemu ravnanju s fuzijskimi odpadki v glavnem prinese to, da za razliko od fisijskih ne sproščajo zapoznele toplote [1, 2].



## Zaključek

Znanstveniki se nadejajo, da bodo z ITER lahko dovolj natančno preučili obnašanje plazme, da jo bodo znali kontrolirati. S tem bi odprli vrata komercialni rabi fuzijske energije. Glavni problem je doseči ustrezno zaprtje plazme. Ko jim bo to uspelo bodo dalje razvijali postopke za samovzdrževanje fuzijske reakcije. Sem spada predvsem postopek produkcije tritija. Ti projekti naj bi bili končani v 30 letih. Sledilo bi odprtje prve demonstracijske fuzijske elektrarne, pogosto imenovane DEMO. Na njej bi razvili še vso potrebno tehnologijo za komercialno rabo fuzijske energije. Odprtje prve prototipne fuzijske elektrarne, imenovane PROTO, bo po načrtih sledilo 50 let po odprtju ITER. Možne so spremembe načrtov, da bi ta čas skrajšali [16].

## Literatura

- [1] [www.iter.org/default.aspx](http://www.iter.org/default.aspx)
- [2] [en.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power)
- [3] [en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion)
- [4] [www.daviddarling.info/images/binding\\_energy.jpg](http://www.daviddarling.info/images/binding_energy.jpg)
- [5] [en.wikipedia.org/wiki/Inertial\\_confinement\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion)
- [6] [en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_confinement\\_fusion](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_confinement_fusion)
- [7] *Fusion Research: An Energy Option for Europe's Future* (European Commission, Bruselj, 2004).
- [8] [www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/w7x/index.html](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/forschung/w7x/index.html)
- [9] E. J. Doyle, Nucl. Fusion **47**, 2175 (2007).
- [10] [www.bmbf.de/\\_img/images/FOR\\_414\\_tokamak\\_schema.gif](http://www.bmbf.de/_img/images/FOR_414_tokamak_schema.gif)
- [11] [en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen)
- [12] [en.wikipedia.org/wiki/Litium](http://en.wikipedia.org/wiki/Litium)
- [13] R. Aymar, P. Barabaschi in Y. Shimomura, Plasma Phys. Control. Fusion **44**, 519 (2002).
- [14] [en.wikipedia.org/wiki/Madison\\_Symmetric\\_Torus](http://en.wikipedia.org/wiki/Madison_Symmetric_Torus)
- [15] [acs.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/RESEARCH-1991-PRESENT/AFRD/index/96803756.html](http://acs.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/RESEARCH-1991-PRESENT/AFRD/index/96803756.html)
- [16] *ITER the way to fusion power* (European Commission, Bruselj).
- [17] [en.wikipedia.org/wiki/ITER](http://en.wikipedia.org/wiki/ITER)
- [18] [tempest.das.ucdavis.edu/pdg/ITER\\_Website/ITER.htm](http://tempest.das.ucdavis.edu/pdg/ITER_Website/ITER.htm)