

ENERGIJA PRIHODNOSTI – JEDRSKA FUZIJA

ENERGY FOR THE FUTURE – NUCLEAR FUSION

**Jelena Vojvodič Tuma¹, Matija Tuma², Nenad Gubelj³, Dražan Kozak⁴,
Gorazd Kosec¹**

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

³Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

⁴Josip Juraj Strossmayer, University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty, Slavonski Brod, Croatia
jelena.tuma@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2005-09-20; sprejem za objavo – accepted for publication: 2005-11-15

Ocenjeno je naraščanje prebivalstva na Zemlji v naslednjih desetletjih, sočasno naraščanje potreb po primarni energiji in napisani so možni nosilci primarne energije. Razložen je princip jedrske fuzije, navedeni so robni pogoji, pri katerih je zlitje jeder sploh mogoče, in opisana je razlika med jedrsko fisijo in fuzijo. V obeh primerih se skupna masa po končani jedrski reakciji zmanjša, del mase se namreč spremeni v energijo. Prikazani so doslej vloženi napor znanstvenikov, skupaj z najnovejšim projektom ITER. Projekt naj bi končno realiziral težko pričakovano samodejno reakcijo zlitja jeder vodika v jedro helija in s tem rešil problem preskrbe človeštva s primarno energijo.

Ključne besede: fisija, fuzija, ITER, naraščanje prebivalstva, oskrba s primarno energijo

Evaluation of the growth of world population for the next decades, the parallel growth of consumption of primary energy and the sources of primary energy are listed. Description the principle of nuclear fusion, of the boundary conditions for this fusion and of the difference between nuclear fusion and fission are explained. In both cases the mass is decreased in the reaction, since part of the mass is transformed to energy. The achievements of scientists in this field, the newest ITER project included, are presented. In the project the expected self supporting reaction of fusion of hydrogen nuclei to a helium nucleus will be achieved and the problem of supply of primary energy for the humanity solved

Key words: fission, fusion, ITER, growth of population, supply of primary energy

1 NARAŠČANJE PREBIVALSTVA

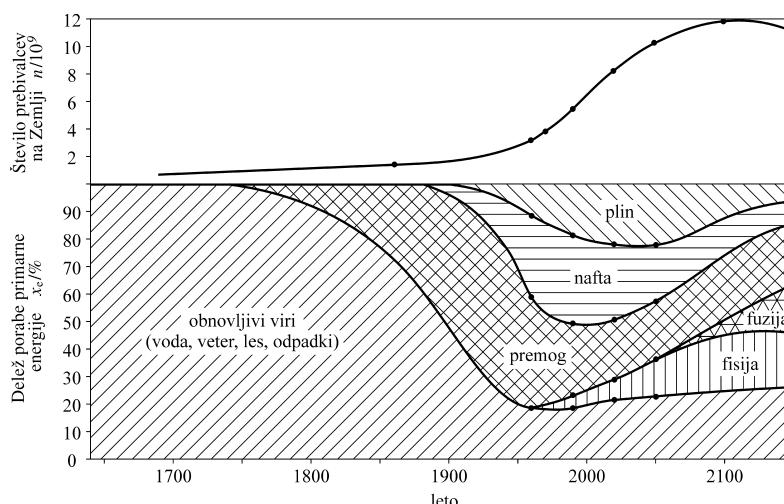
Zaloge primarnih energijskih virov na Zemlji so omejene. Pri sedanji rabi končne energije in pri sedanjih tehnologijah pretvarjanja primarne energije v sekundarno in naprej v končno energijo bo človeštvo zelo kmalu porabilo večji del nosilcev primarne energije, ki jih je danes mogoče gospodarno izkoriščati. V nekaj generacijah bo začelo primanjkovati zemeljskega plina, kmalu nato tudi surove nafte in izotopa urana ²³⁵U. Dalj časa je mogoče računati le na premog in na izotop urana ²³⁸U. Pri tem pa se moramo zavedati, da je sedanji način zgorevanja premoga povezan s tvorjenjem velikih količin CO₂ v dimnih plinih, današnji oplodni reaktorji, v katerih se uporablja za gorivo uran ²³⁸U, pa še niso zreli za industrijsko uporabo. Raziskave znanstvenikov gredo v dveh smereh:

- sedanje energijske vire uporabljati bolj smotrno;
- čim prej začeti izkoriščanje novih.

Slika 1 prikazuje projekcijo naraščanja prebivalstva in ocenjeno porabo primarnih energijskih virov v naslednjih desetletjih. Na sliki so označene točke naraščanje prebivalstva do leta 2100 in porabe primarnih energijskih virov do leta 2050. Po tej projekciji bo človeštvo leta 2100 doseglo število 12 milijard, ki bo nato začelo počasi upadati. To so rezultati raziskav več kot 500 strokovnjakov v okviru združenja World Energy Council ^{1,2}.

Sočasno z naraščanjem prebivalstva skušajo strokovnjaki predvideti tudi prihodnjo povprečno porabo primarne energije na prebivalca na leto. Napovedi se na daljšo dobo med seboj razlikujejo za več kot 100 %. Kljub temu pa dobro služijo za oceno strukture prihodnje porabe primarne energije in kažejo, da povračljivi viri še dolga desetletja ne bodo nadomestili fosilnih in jedrskih energijskih virov. Še vedno je boljše upoštevati nezanesljive napovedi poklicanih kot pa "zanesljive" napovedi nepoklicanih! Za nadaljnje razmišljanje je vzeta predvidena poraba energije do leta 2050, ki so jo prav tako sestavili strokovnjaki v okviru združenja World Energy Council. Napoved je ekstrapolirana za naslednjih sto let, tj. do leta 2150, in upošteva predvsem napovedi strokovnjakov glede rabe obnovljivih energijskih virov in jedrske fisije (današnji in novi jedrski reaktorji) ter mnenje strokovnjakov, da bodo do sredine tega stoletja rešeni glavni problemi jedrske fuzije.

Slika 1 je nadalje razvidno, da se morda prav v našem času dogaja prelomnica v strukturi porabe primarne energije: dosežena je največja poraba nafte in zemeljskega plina na prebivalca na leto. V naslednjih desetletjih naj bi se poraba klasičnih fosilnih goriv (predvsem tekočin in plinastih, manj trdih) na zemljana procentualno zmanjševala, pri tem pa bo naraščalo prebivalstvo na Zemlji od današnjih 6 na 12 milijard. Obnovljivi viri primarne energije, od katerih je najpomembnejša potencialna energija vode, nas ne bodo rešili.



Slika 1: Projekcija naraščanja prebivalstva in porabe primarne energije
Figure 1: Projection of world population growth and of use of primary energy

Iz energetske zadrege nam bo najverjetneje pomagala jedrska fisija in predvsem jedrska fuzija, ki pa je danes šele v povojih.

Obnovljivi energijski viri bodo čez sto let zadostovali za približno četrtno človeštva, to je za 4 milijarde ljudi od skupno 12 milijard. Približno 8 milijard ljudi pa bo odvisnih od premoga, od jedrskih fuzijskih reaktorjev, vedno manj pa od fisijskih ter od nafte in zemeljskega plina. Ne glede na vrsto primarnih energijskih virov bodo sedanje parne in plinske turbine obdržale svojo pomembnost, kajti pretežni del pretvorb primarne energije v sekundarno se bo tudi v naslednjih desetletjih odvijal preko vmesne pretvorbe v toploto v parnih kotlih, jedrskih reaktorjih in plinskih gorilnikih ter motorjih z notranjim zgorevanjem³. Poviševala se bo temperatura sveže pare v parnih postrojenjih in temperatura plinov v plinskih postrojih, tako se bo še nadalje povečeval izkoristek termoelektarn. Seveda pa je v prihodnje treba računati tudi s postroji in tehničnimi postopki, kjer se bo primarna energija pretvarjala naravnost v sekundarno, na primer: sončne celice, gorivne celice, magnetnohidrodinamični generatorji. Strokovnjaki pripisujejo nadalje velike možnosti boljšemu izkoriščanju vseh vrst premogov in urana, pri tem pa resno opozarjajo na nevarnost učinka tople grede. Dosedanje raziskave potrjujejo naslednja dejstva⁴:

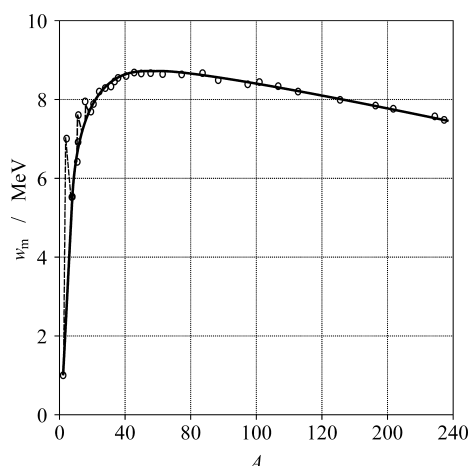
- v naslednjih 30 letih bo porabljeno toliko energije iz fosilnih goriv, kot je je bilo doslej v celotni človeški zgodovini;
- fosilni primarni energijski viri bodo tudi v prihodnosti nosili glavno težo preskrbe z energijo;
- obnovljivi energijski viri (biomasa, veter, voda in sonce) bodo pridobivali na pomembnosti, vendar pa bo v absolutnem znesku njihov pomen tudi v prihodnje manjšinski;
- jedrska energija bo potrebna tudi v prihodnje;
- energetika bo v prihodnje v veliki meri krojila okoljevarstvene ukrepe.

2 JEDRSKA FUZIJA – PRIMARNA ENERGIJA PRIHODNOSTI

Gledano na daljšo dobo, več desetletij, lahko zagotovijo blagostanje človeštvu samo novi viri primarne energije. Mednje spadajo predvsem: sevanje sonca, cepitev jeder težkih kemijskih elementov (jedrska fisija) v novih tipih jedrskih reaktorjev in zlitje jeder lahkkih elementov (jedrska fuzija).

Energija sončnega sevanja bo v prihodnjih desetletjih, skupaj s potencialno energijo vode zagotavljala približno 25 % vseh potreb po primarni energiji. Na račun zmanjševanja deleža fosilnih energijskih virov – predvsem plinastih in tekočih – se bo povečeval delež jedrskih: najprej v obstoječih in v novih fisijskih reaktorjih (pri tem pričakujemo, da bodo oplodni jedrski reaktorji nasledili današnje termične) in pozneje v jedrskih fuzijskih reaktorjih. Ti naj bi človeštvu v naslednjih stoletjih zagotovili dovolj koristne energije. Prav o tej vrsti jedrske energije je v zadnjem času veliko napisano – odkar je dokončno odločeno, da bo v Franciji postavljen fuzijski reaktor ITER.

Vsak atom je sestavljen iz električno pozitivno nabitega jedra in negativno nabitih elektronov, ki se gibljejo okrog jedra po energijsko razvrščenih lupinah. Skoraj vsa masa atoma je v jedru, ki ga sestavljajo nukleoni: pozitivno nabiti protoni in električno nevtralni nevtroni. Skupno število nukleonov daje masno število elementa A . Na primer: uranov atom ^{238}U ima v sistemu elementov zaporedno število 92 in masno število $A = 238$; sestavlja ga 92 protonov in 146 nevtronov, to je: $92 + 146 = 238$ nukleonov. Energijo, ki jo je treba dovesti, da se jedro atoma razbije na nukleone, imenujejo vezavna energija; ta energija je pri zelo lahkkih kemijskih elementih (vodik, helij) z nekaterimi izjemami majhna, doseže pa svojo največjo vrednost pri masnih številih A od 50 do 100, nato se začne zopet zmanjševati. Z večanjem atomske mase postaja razmerje med nevtroni



Slika 2: Srednja vezavna energija za nukleon v odvisnosti od masnega števila

Figure 2: Average nucleus binding energy in dependence of the mass number

in protoni v jedru vedno večje, dokler se končno ravnotežje sil v jedru ne začne rušiti. Sile, ki vežejo delce jedra, niso več dovolj močne, da bi držale v ravnotežju protone. Zato so vsi elementi z masnim številom $A > 200$ nestabilni, **slika 2**.

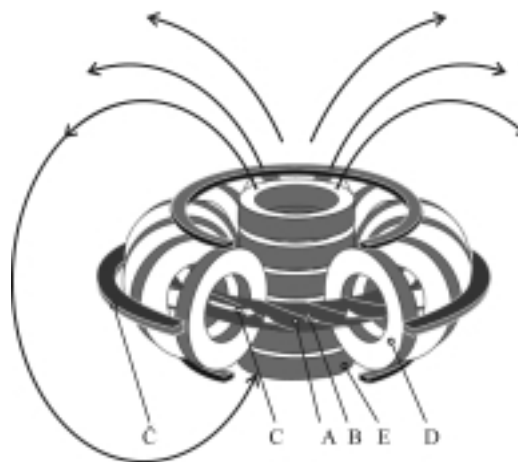
Glede na vezavno energijo obstajata dve možnosti pridobivanja jedrske energije:

- zlitje jader najlažjih elementov, na primer vodika, v jedra z večjo atomsko maso (= jedrska fuzija) in
- cepitev jader najtežjih elementov, na primer urana, v jedra z manjšo atomsko maso (= jedrska fisija).

V enem in drugem primeru se je skupna masa po končani jedrski reakciji zmanjšala; del mase se je spremenil v energijo po Einsteinovi enačbi: $W = m \cdot c_s^2$. Jedrska fuzija še nekaj časa ne bo konkurenčna drugim vrstam primarnih energij. Spontano se sprošča na Soncu, občutimo jo kot sevanje Sonca, na Zemlji pa je bila umetno sproščena z atomsko vodikovo bombo. Nasprotno pa se jedrska fisija izkorišča v miroljubne namene že okrog 50 let – skoraj izključno za proizvodnjo električne energije: od leta 1951 naprej iz majhnega poskusnega reaktorja v puščavi Idaho, ZDA in od leta 1954 naprej iz le nekaj večjega reaktorja v kraju Obninsk, Rusija, 100 km jugozahodno od Moskve.

Zlitje jader je težko vzpostaviti in še težje obdržati. Jedra atomov so namreč pozitivno nabita in se zato med seboj odbijajo. Da pride do zlitja, je treba to elektrostatično pregrado (Coulombove sile) nekako premostiti – jedra je treba spojiti z uporabo neke zunanje sile. Za to morajo biti izpolnjeni trije glavni pogoji:

- zelo visoka temperatura: jedra se morajo gibati zelo hitro;
- velika gostota: jedra morajo biti dovolj tesno skupaj, da se poveča verjetnost trkov;
- stisnjena in vroča jedra morajo biti dovolj dolgo v tem stanju, da se začne spajanje jader in da se to spajanje tudi obdrži.



Slika 3: Delovanje tokamaka

A – plazma, B – krivulje magnetnega polja, C – smer toka plazme, Č – horizontalno magnetno navitje, D – toroidalno magnetno navitje, E – transformatorsko navitje

Figure 3: Working of the tokamak

A – Plasma, B – Magnetic field curves, C – Direction of the plasma current, Č – Horizontal magnetic winding, D – Thoroidal magnetic winding, E – Trasformer winding

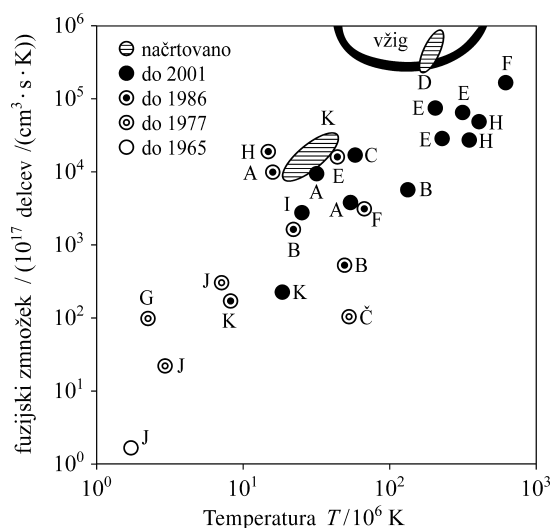
Na Soncu je ta sila težnost, ki drži skupaj, stiska in razžari jedra atomov. To je mogoče samo pri zvezdah, ki imajo dovolj veliko maso in dovolj visoko temperaturo; na Zemlji ni teh razmer, zato je treba iskati drugo pot. Pri temperaturah nad 10^8 K je vsaka snov v obliki plazme: elektroni, ki sicer krožijo okrog jeder, se pri visokih temperaturah ločijo od njih. Nastane plazma – to je mešanica, ki jo sestavljajo prosti, negativno nabiti elektroni in prosta, pozitivno nabita jedra ali ioni. Plazma je torej sestavljena iz električno nabitih delcev in jo je zato mogoče z magnetnim poljem obdržati v določenih tirih.

Po dosedanjih izkušnjah se najlažje spajata izotopa vodika: devterij in tritij. Devterij je naraven izotop, vsak liter morske vode ga vsebuje 0,0297 g; tritij v naravi ne obstaja, pridobiti ga je mogoče iz litija, vendar je radioaktiven. Da bi dosegli podobne razmere, kot so na Soncu, je treba ta dva izotopa vodika segreti na najmanj 10^8 K. To je precej več, kot je temperatura v notranjosti Sonca, ki je le $(15-20) \cdot 10^6$ K, vendar je to nujno zaradi manjše gostote plazme, s katero imamo opravka na Zemlji. Če se nam posreči ujeti plazmo v magnetno polje, dosežejo atomi vodika pri visokih temperaturah tako veliko notranjo energijo, da dovolj pogosto udarjajo eden ob drugega in da se končno zlijejo v težja jedra helija.

Tudi pri zlitju jader so najvažnejši nosilci energije, poenostavljeno napisano, nevtroni (80 %) in v manjši meri α -delci (20 %). V opisanem primeru se zmanjša masa približno za 0,4 %. Pri 1 kg plazme je tako sproščena energija po Einsteinovi enačbi enaka:

$$W = 0,4 \cdot 10^3 \cdot 300'000'000^2 = 36 \cdot 10^{18} \text{ J}$$

Jedro devterija sestavljata pozitivno nabit proton in nevtralni nevtron, jedro tritija pa proton in dva nevtrona.

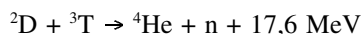


Slika 4: Doslej opravljene raziskave in področje samodejnega delovanja jedrske fuzije

Figure 4: Achievements of up to day investigations and area of self supporting nuclear fusion

A – Alcator, Boston, ZDA, B – Asdex, Garching, Nemčija, C D – III-D, San Diego, ZDA, Č – Isar 1, Garching, Nemčija, D – ITER, Cadarache, Francija, E – Jet, Culham, Velika Britanija, F – JT 60, JT 60-U, Naka, Japonska, G – Pulsator, Garching, Nemčija, H – TFTR, Princeton, ZDA, I – Tore Supra, Cadarache, Francija, J – T3, T10, Moskva, Rusija, K – Wendelstein, Garching, Nemčija

Če pride do zlitja jader teh dveh vodikovih izotopov, dobimo jedro helija, ki je sestavljeno iz dveh protonov in dveh nevtronov, enega α -delca in prostega nevtrona:



Za zlitje jader potrebujemo energijo približno 0,1 MeV ($1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ J}$), po reakciji pa se sprosti precej več energije, namreč 17,6 MeV. Zlitje v plazmi pa ni odvisno samo od visoke temperature, ampak tudi od zmnožka časa, ko se dovedena energija zadrževati v plazmi, in gostote te plazme. Zaradi izredno visokih temperatur je zelo težko dovolj dolgo zadržati v plazmo dovedeno energijo. Čim je doseženo zlitje jader, je mogoče izključiti dovod energije od zunaj, spajanje jader postane samodejno. Tako samodejno zlitje pa ne proizvaja samo dovolj toplote za ohranjanje visoke temperature, ampak proizvaja tudi dovolj energije za priključen parni ali kak drug proces.

Zlitje jader je mogoče doseči v posebni napravi, imenovani tokamak (ruska kratica za toroidalna kamera + magnetna kartuška; Rusi veljajo za pionirje na področju fuzije), ki je zgrajena v obliki obroča in obdana z močnimi elektromagneti. V obroču se plin zaradi električnega stika segreje in spremeni v plazmo. Obroč ima troje magnetnih polj z namenom, da prisilijo vklenjeno plazmo, da se odmakne od sten, da ostane stisnjena in vroča, **slika 3**. Zaradi nastalega vmesnega vakuuma plazma ne more priti v dotik s hladno steno. Tako se manj hladi in se ne more navzeti nečistoč. Z naraščanjem temperature se električna prevodnost plazme močno poveča, njena električna upornost postaja manjša; s tem

se manjša tudi dovedena energija, ki je potrebna za gretje plazme.

3 EKSPERIMENTALNI FUZIJSKI JEDRSKI REAKTOR ITER

Kako daleč so prišli znanstveniki, prikazuje **slika 4**⁵. Na ordinati je nanesena gostota (kg/cm^3) pomnožena s časom (s), v katerem je energija ostala na zelenih parametrih, na abscisi pa absolutna temperatura (K). Na diagramu je označeno področje, v katerem pride do samodejnega zlitja jader. Kljub množici nerešenih problemov znanstveniki upajo, da bodo prvi fuzijski jedrski reaktorji začeli obratovati v naslednjih desetletjih. Danes so vsa upanja znanstvenikov usmerjena na poskusni jedrski fuzijski reaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Demonstracijski projekt je zelo zahteven – tako zahteven, da so združili svoje finančne in intelektualne kapacitete vse vodilne države na svetu: Evropska unija, Japonska, Združene države Amerike in Rusija, Kitajska in Južna Koreja. Junija 2005 je bilo odločeno, da bo reaktor postavljen v Franciji v kraju Cadarache. Čeprav gre za 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. Stroški so ocenjeni na 3 do 4 milijarde evrov. Nekaj nadaljnjih tehničnih podatkov⁶:

- višina: 24 m
- širina: 30 m
- polmer obroča plazme: od 2,0 m do 6,2 m
- volumen plazme: 837 m³
- fuzijska (toplotna) moč: od 400 MW do 500 MW
- električni tok v plazmi: 15 MA
- razmerje: odvedena/dovedena moč: od 5 do 10

ITER bo prvi fuzijski reaktor, ki bo proizvajal neto toplotno moč in sicer od 5- do 10-krat več, kot bo dovedena moč. Sevanje je v primerjavi s fisijskimi jedrskimi reaktorji majhno, jedrski odpadki pa so precej manj nevarni, kot so pri fisijskem reaktorju. Pri fuziji gre namreč za spajanje lahkih jader, zato nimamo dolgoživih jedrskih odpadkov. Postrojenje za proizvodnjo električne energije ni predvideno. Mogoče pa je grobo izračunati, da bi proizvedena toplotna moč zadostovala za proizvodnjo kakih 350 MW električne moči. Za primerjavo: investicijski stroški postavitve sodobnega evropskega fisijskega reaktorja toplotne moči 4'400 MW in električne moči 1500 MW so od 1600 EUR/kW do 1800 EUR/kW⁷, torej stane postavitve sodobne jedrske elektrarne od 2,4 do 2,7 milijarde evrov – torej precej manj kot postavitve eksperimentalnega fuzijskega reaktorja približno štirikrat manjše električne moči.

Projekt ITER naj bi končno realiziral težko pričakovano samodejno reakcijo zlitja jader 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.

reaktorja ITER, katerega gradnja je bila dokončno dogovorjena junija 2005.

4 SKLEPI

- Napovedi, ki jih je izdelal World Energy Council (WEC), kažejo, da bo prebivalstvo na Zemlji okrog leta 2100 doseglo svoj maksimum, 12 milijard ljudi.
- Zaradi stalnega naraščanja prebivalstva in stalnega dviga življenjske ravni tega prebivalstva se bo po podatkih WEC v naslednjih letih začela zmanjševati specifična poraba surove nafte in zemeljskega plina na prebivalca na leto.
- Zadrego zaradi vedno večje absolutne porabe primarnih energijskih virov lahko reši jedrska fuzija; strokovnjaki stavijo na projekt eksperimentalnega

5 LITERATURA

- ¹ World Energy Council: Energija za jutrišnji svet, zal. Komisija Svetovnega energijskega sveta, Ljubljana 1994
- ² World Energy Council: Energy for Tomorrow's World – Acting Now, zal. Atalink Project Ltd, London 2000
- ³ Wissenschaftlicher Beirat der VGB PowerTech e.V.: Forschung für eine nachhaltige Energieversorgung, julij 2001
- ⁴ Gyarmathy, G.: Innovation and Tradition in Steam Turbine Engineering, Proc. Instn. Mech. Engrs. 204 (1990), 217–231
- ⁵ Milch, I.: Status quo und Perspektiven der Fusionsforschung, Brennstoff- Wärme-Kraft 53 (2001) 9, 25–27
- ⁶ Internet: www.iter.org
- ⁷ Kaspar, K.: Der SWR 1000 – ein neues Siedewasserreaktor Konzept, VGB Kraftwerkstechnik 79 (1999) 4, 21–25