

## Nagovor predsednika DMFA ob izdaji slovenskega prevoda

*Spoštovane kolegice in kolegi,*

Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije (DMFA) je član Evropskega fizikalnega združenja (EPS), ki je novembra 2007 objavilo Stališče o vlogi jedrske energije pri energijski preskrbi v prihodnosti. Cilj objave je opozoriti člane združenja na pomen jedrske energije, na povezave zagotavljanja energije s podnebnimi spremembami in na strateške odločitve glede preskrbe z energijo, s katerimi se sooča Evropa. Posledice odločitev bodo daljnosežne in jih bo občutil vsak posameznik, zato morajo svoje mnenje o njih podati tudi strokovna združenja, kakršno je EPS.

Slovenija je del Evrope in se vprašanjem o preskrbi z energijo in o podnebnih spremembah ne more in ne sme izogniti. Menim, da je Stališče EPS primerna strokovna podlaga za široko in argumentirano razpravo o bodoči energijski preskrbi Slovenije. Zaradi lažje dostopnosti Stališča slovenski strokovni in širši javnosti smo se pri DMFA odločili za izdajo slovenskega prevoda. V skrbi za korektno slovenjenje strokovnih izrazov smo za prevod besedila zaprosili člane Društva jedrskih strokovnjakov Slovenije, ki se jim za vestno opravljeno delo iskreno zahvaljujem.

Prof. Dr. Janez Seliger,  
*Predsednik DMFA*

# ENERGIJA ZA PRIHODNOST - Jedrska opcija

## Stališče EPS

Evropsko fizikalno združenje (EPS – European Physical Society) je neodvisno telo, ki ga s svojimi prispevki podpirajo nacionalna fizikalna združenja, druga telesa in posamezni člani. EPS predstavlja več kot 100 000 fizikov in se lahko sklicuje na ekspertize z vseh področij, kjer je vpletena fizika.

Objavljeno stališče (v nadaljnjem tekstu »Stališče«) sestavlja dva dela: Stališče EPS, ki povzema priporočila, ter znanstveno/tehnični del. Znanstveno/tehnični del je bistven za razumevanje Stališča, ker vsebuje osnovna dejstva in argumente EPS.

### 1. Cilj Stališča (preambula)

Uporaba jedrske energije za proizvodnjo elektrike je širom sveta predmet debate: nekatere države bistveno povečujejo njeno izkoriščanje, druge jo postopoma opuščajo, nekatere pa celo zakonsko prepovedujejo njeno uporabo. To Stališče želi uravnoteženo predstaviti razloge za in proti jedrski energiji ter informirati odgovorne posameznike (odločevalce) in splošno javnost s preverljivimi dejstvi. Prav tako želi prispevati k demokratični razpravi, ki priznava tako znanstvena in tehnična dejstva kot tudi pomisleke ljudi.

### 2. Poraba energije in proizvodnja elektrike v prihodnosti (Poglavje 1)

Svetovno rast prebivalstva z današnjih 6,5 milijard na ocenjenih 8,7 milijard v letu 2050 bo spremljalo 1,7 % letno povečanje potreb po energiji. Noben posamezen vir ne bo mogel zadostiti energetskim potrebam prihodnjih generacij. V Evropi je približno tretjina vse energije dobavljena v obliki elektrike, od katere je 31 % proizvedene v jedrskih elektrarnah in 14,7 % iz obnovljivih virov. Čeprav je prispevek iz obnovljivih virov energije od začetka 90- tih let pomembno narasel, povpraševanja po

elektriki realistično ni mogoče zadovoljiti brez jedrskega prispevka.

### 3. Potreben je energetski cikel brez izpustov CO<sub>2</sub> (Poglavje 1)

Izpusti antropogenih toplogrednih plinov, med katerimi je glavni ogljikov dioksid, so povečali naravni učinek tople grede in privedli do globalnega segrevanja. K toplogrednim plinom največ prispeva kurjenje fosilnih goriv. Nadaljnje povečanje toplogrednih plinov bo odločilno vplivalo na življenje na Zemlji. Za borbo s klimatskimi spremembami je, kjer je le mogoče, potreben energetski cikel z najmanjšimi možnimi izpusti CO<sub>2</sub>. Jedrske elektrarne proizvajajo elektriko brez izpustov CO<sub>2</sub>.

### 4. Jedrska energija danes (Poglavje 2)

Na svetu obratuje 435 jedrskih elektrarn, ki proizvedejo 16% vse elektrike in dobavljajo zanesljivo pasovno in vršno energijo. Rezultat černobilske nesreče so bile obširne diskusije o varnosti jedrskih elektrarn, izraženi so bili tudi resni pomisleki. Evropske jedrske zmogljivosti se v bližnji prihodnosti verjetno ne bodo dosti razširile, vendar pa je pomembna širitev predvidena v Kitajski, Indiji, Japonski in Republiki Koreji.

### 5. Pomisleki (Poglavji 3 in 4)

Tako kot katerikoli drug vir energije tudi proizvodnja jedrske energije ni brez nevarnosti. Možnost nesreče v jedrskih elektrarnah, odlaganje odpadkov, možnost širjenja jedrskega orožja (proliferacija) in grožnje skrajnežev predstavljajo resne pomisleke. Sprejemljivost tveganj jedrske energije je stvar presoje, ki mora upoštevati specifična tveganja alternativnih virov energije. Presoja mora biti racionalna in na osnovi tehničnih argumentov, znanstvenih

ugotovitev, odprte diskusije o dokazih in primerjave z nevarnostmi drugih virov energije.

### 6. Proizvodnja jedrske energije v prihodnosti (Poglavje 5)

Kot odziv na pomisleke o varnosti je bila razvita nova generacija reaktorjev (III. generacija), katere značilnost je moderna varnostna tehnologija in izboljšano preprečevanje nesreč. Cilj je, da v primeru izredno malo verjetnega dogodka taljenja sredice vse radioaktivne snovi ostanejo znotraj sistema za drževalnega hrama.

Leta 2002 je mednarodna delovna skupina predstavila zamisel za IV. generacijo reaktorjev, ki so inherentno varni. Njihova značilnost je tudi izboljšana ekonomičnost proizvodnje elektrike, zmanjšana količina jedrskih odpadkov, ki jih je potrebno odlagati, ter večja odpornost proti proliferaciji. Čeprav so potrebne še nadaljnje raziskave, je pričakovati, da bodo nekateri od teh sistemov začeli delovati leta 2030.

Sistemi reaktorjev, ki delujejo s pomočjo pospeševalnika (Accelerator Driven Systems – ADS) omogočajo transmutacijo plutonija in aktinidov, ki predstavljajo glavno dolgoročno komponento radioaktivnih odpadkov iz današnjih fisijskih reaktorjev. Tudi ti lahko znatno prispevajo k proizvodnji jedrske energije v velikem obsegu po letu 2020.

Fuzijski reaktorji proizvajajo energijo brez izpustov CO<sub>2</sub> z zlivanjem devterija in tritija. Za razliko od fisijskih reaktorjev tu ne nastajajo dolgoživi radioaktivni odpadki. Ta obetavna tehnologija utegne postati dosegljiva v drugi polovici tega stoletja.

### 7. Stališče Evropskega fizikalnega združenja (Poglavje 6)

Glede na okoljske probleme, s katerimi se danes sooča naš planet, sedanje generacije dolgujejo prihodnjim, da se ne odrečejo tehnologiji, ki je do-

kazano sposobna dobavljati elektriko zanesljivo in varno brez izpustov CO<sub>2</sub>. Jedrska energija zmora in mora dati pomemben prispevek k naboru virov z nizkimi izpusti CO<sub>2</sub>. To bo možno le v primeru, če bo podpora javnosti pridobljena z odprto demokratično razpravo, ki bo spoštovala pomisleke ljudi ter jih informirala s preverljivimi znanstvenimi in tehničnimi dejstvi.

Proizvodnji elektrike iz jedrske energije v nekaterih evropskih državah nasprotujejo in le v redkih podpirajo raziskave s področja jedrske cepitve. Število študentov na tem področju zato upada, prav tako pa se zmanjšuje število usposobljenih ljudi v jedrski znanosti. Obstaja jasna potreba za šolanje v jedrski znanosti in ohranitev jedrskega znanja, kot tudi dolgoročne raziskave jedrske cepitve, zlivanja, metod izgorevanja odpadkov ter njihove transmutacije in skladiščenja.

Evropa mora sodelovati v razvoju in projektiranju reaktorjev neodvisno od kakršnekoli odločitve o njihovi gradnji v Evropi. Investiranje v raziskave in razvoj jedrskih reaktorjev je bistveno tudi zato, da bo Evropa ostala sposobna slediti programom hitro razvijajočih se držav (npr. Kitajske in Indije, ki so se zavezale k gradnji jedrskih elektrarn) in pomagati zagotavljati njihovo varnost z aktivno udeležbo v Mednarodni agenciji za atomsko energijo.

Izvršni komite  
Evropskega fizikalnega združenja  
November 2007

**PREAMBULA**

Evropsko fizikalno združenje se čuti odgovorno, da izrazi svoje stališče glede zadev, v katerih fizika igra pomembno vlogo in ki so splošnega pomena za družbo. Sledeča izjava o jedrski opciji in njeni vlogi v bodoči trajnostni proizvodnji elektrike v velikem obsegu brez izpustov CO<sub>2</sub> je motivirana z dejstvom, da mnoge visoko razvite evropske države v svojih dolgoročnih energetske usmeritvah ignorirajo jedrsko opcijo. Klimatske spremembe, naraščanje svetovnega prebivalstva, omejeni naravni viri našega planeta, hitra ekonomska rast azijskih in latinsko-ameriških držav ter upravičene težnje držav v razvoju k primernemu življenjskemu standardu neizogibno kažejo na potrebe po trajnostnih virih energije.

Avtorji tega poročila so člani Odbora za jedrsko fiziko Evropskega fizikalnega združenja, ki so aktivni na področju osnovnih jedrskih raziskav, vendar niso povezani z jedrsko industrijo. Poročilo predstavlja naše videnje razlogov »za« in »proti« jedrski energiji kot trajnostnega vira za zadovoljevanje dolgoročnih energetske potreb. Pozivamo k ponovni obravnavi načrtov o postopnem opuščanju jedrskih elektrarn, ki delujejo varno in učinkovito. Poudarjamo potrebnost nadaljnjih raziskav

jedrskje energije, še posebej IV. generacije reaktorjev, ki obetajo pomemben korak naprej glede varnosti, recikliranja jedrskega goriva ter izgorevanja in odlaganja radioaktivnih odpadkov. Poudarjamo nujnost ohranjanja jedrskega znanja s pomočjo izobraževanja in raziskav na evropskih univerzah ter institutih.

**Hartwig Freieleben**  
(predsednik Odbora za jedrsko fiziko),  
Technische Universität Dresden, Germany

**Ronald C. Johnson,**  
University of Surrey, Guildford, United Kingdom

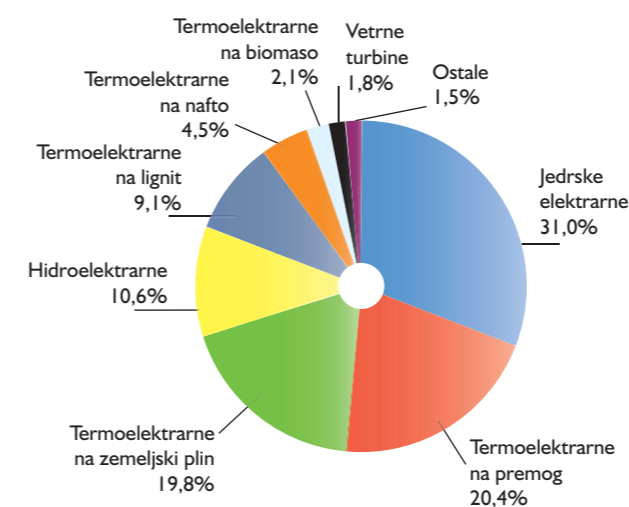
**Olaf Scholten,**  
Kernfysisch Versneller Instituut, Groningen,  
The Netherlands

**Andreas Türler,**  
Technische Universität München, Germany

**Ramon Wyss,**  
Royal Institute for Technology, Stockholm,  
Sweden

November 2007, **The European Physical Society**  
6 rue des Frères Lumière,  
68060 Mulhouse cedex, France

bodisi radioaktivni odpadki zaradi uporabe jedrskih goriv, da omenimo le dvoje. V naslednjih odstavkih opisujemo stanje velikih virov primarne energije in današnjo proizvodnjo elektrike v Evropi ter izpostavljamo problem izpustov CO<sub>2</sub>. Obravnavana je tudi svetovna poraba energije v prihodnosti.



▲ **Slika 1:** Proizvodnja elektrike glede na gorivo, EU-25, 2004 vir: [2]

**Veliki viri primarne energije**

V letu 2004 je celotna proizvodnja primarne energije v 25 državah EU ustrezala 0,88 milijarde ton nafte ali 10,2 PWh (1PWh = 1 petavatna ura = 1 milijarda MWh) [2]. Ta energija je izvirala iz vrste

velikih virov primarne energije (jedrskja: 28,9%, zemeljski plin: 21,8%, črni premog in lignit: 21,6%, surova nafta: 15,3%) in njihovih derivatov (koks, kurilno olje, bencin) ter manjših obnovljivih virov (biomasa in odpadki: 8,2%, vodna energija: 3%, geotermična energija: 0,6%, veter: 0,6%; skupaj 12,4%). Primarni viri omogočajo koncentrirano energijo za industrijo, kmetijstvo in gospodinjstva ter za transport. Dodatno je mogoče nafto in plin uporabiti kot razpršena vira, primerna za proizvodnjo energije v manjšem merilu, zato sta zelo primerna za npr. transport. Iz navedenih števil je očitno, da jedrska energija zagotavlja bistven del sedanje dobave energije.

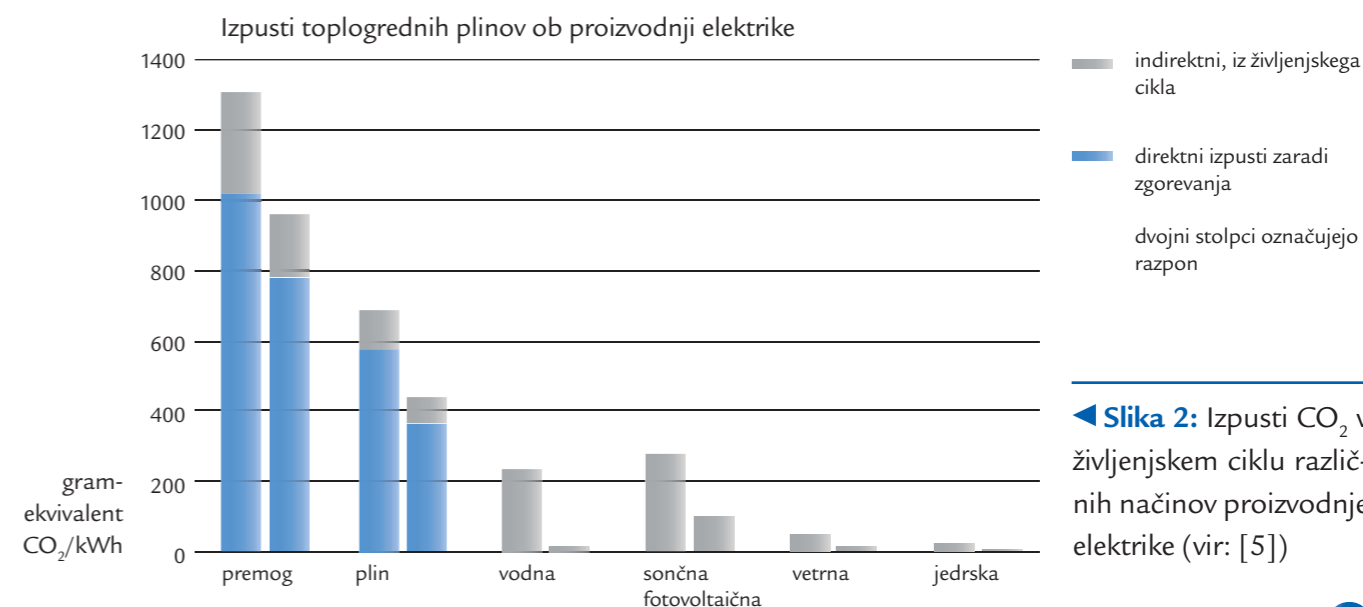
Približno 58,7% celotne proizvodnje energije izvira iz zgorevanja fosilnih goriv (črni premog, lignit, surova nafta, zemeljski plin). Izgorevanje fosilnih goriv spremljajo izpusti CO<sub>2</sub>, ki povzročijo 75% antropogenega učinka tople grede. Pomembno prispevajo še metan (CH<sub>4</sub>, 13%), dušikov oksid (N<sub>2</sub>O, 6%) in kloro-fluoro-ogljiki (5%) [2]. Za borbo proti učinku tople grede je potrebno čimbolj zmanjšati uporabo fosilnih goriv oz. kjerkoli je mogoče, drastično zmanjšati neto proizvodnjo ogljikovega dioksida iz fosilnih goriv. Največje možnosti za zmanjšanje izpustov CO<sub>2</sub> so v proizvodnji elektrike, v transportnem sektorju in v učinkoviti rabi, npr. z varčevanjem energije.

**ENERGIJA ZA PRIHODNOST - Jedrska opcija**  
**Znanstveno/tehnični del**

**1. Potrebe po trajnostni dobavi energije brez izpustov CO<sub>2</sub>**

Vsakomur dosegljiva energija je potreben pogoj za blagostanje človeštva, svetovni mir, socialno pravičnost in ekonomski razcvet. Vendar ima človeštvo na razpolago le en svet in mora zapustiti prihodnjim generacijam svet v stanju, ki omogoča življenje. To je pomen izraza »trajnosten«, ki je definiran v Brun-

tlandinem poročilu [1] iz leta 1987: »Trajnosten razvoj zadošča potrebam sedanje generacije brez ogrožanja možnosti prihodnjih generacij, da zadovoljijo svoje potrebe«. Ta etični imperativ zahteva, da vsaka razprava o prihodnji energiji vključuje kratkoročne in dolgoročne vidike določenega energetskega vira, kot so dosegljivost, varnost ter vpliv na okolje. Glede slednjega je najvišja skrb nastajanje in ogrožanje z odpadki, najsi bo to CO<sub>2</sub> zaradi kurjenja fosilnih goriv,



◀ **Slika 2:** Izpusti CO<sub>2</sub> v življenjskem ciklu različnih načinov proizvodnje elektrike (vir: [5])

## Proizvodnja elektrike in izpusti CO<sub>2</sub>

Celotna proizvodnja elektrike v 25 državah EU znaša 3,2 PWh, kar ustreza 32,3% vse proizvedene energije EU v letu 2004. Slika 1 kaže deleže posameznih primarnih virov v proizvodnji elektrike. Približno 31,0% prispevajo jedrske elektrarne, 10,6% vodne elektrarne, 2,1% elektrarne na biomaso, 1,8% vetrne turbine. Potem je še 1,5% drugih virov, med katerimi geotermalna energija prispeva 0,2%; prispevek fotovoltaičnih elektrarn pa je zanemarljiv [2]. Nobeden od teh virov med obratovanjem ne sprošča CO<sub>2</sub>. V nasprotju z njimi elektrarne na plin, nafto in premog med obratovanjem sproščajo CO<sub>2</sub>; skupno pa proizvedejo 52,9% elektrike.

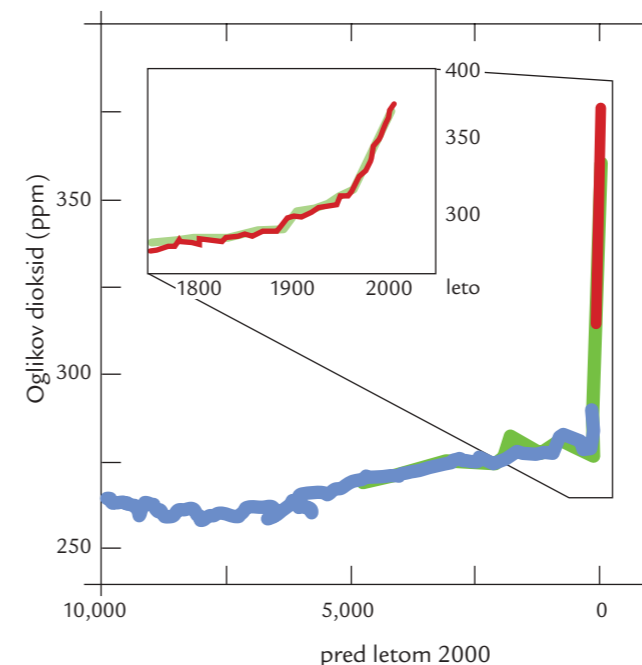
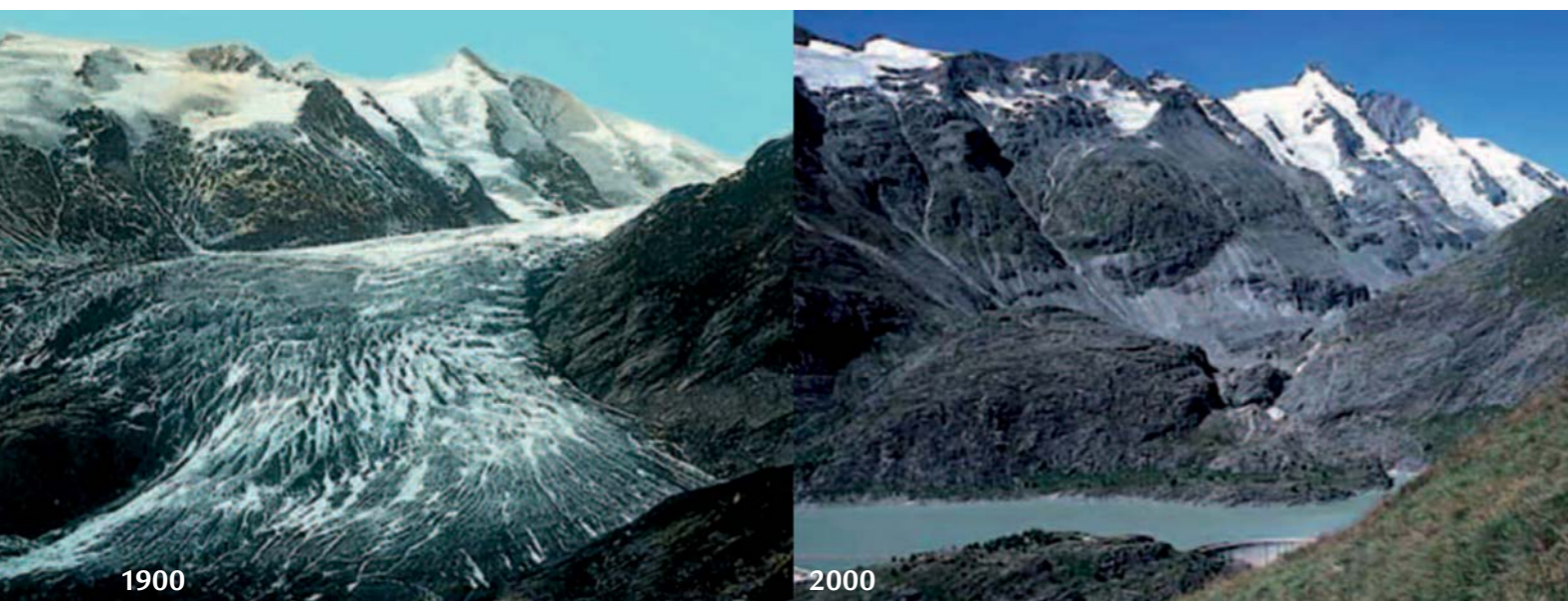
Te številke kažejo, da so jedrske elektrarne pomemben steber proizvodnje elektrike v Evropi; v velikem obsegu dobavljajo stabilno energijo v pasu in po potrebi tudi vršno energijo. Zmanjšanje njihovega prispevka bo povzročilo resno pomanjkanje elektrike v Evropi.

Za vse vire elektrike je potrebno zgraditi elektrarne in dobavljati gorivo. Te dejavnosti obsegajo rudarjenje, pretvorbo rude in transport ter tudi same prispevajo k izpustu CO<sub>2</sub>. Skupaj tvorijo začetni del gorivnega cikla. Obstaja tudi

končni del gorivnega cikla. V primeru jedrskih elektrarn spada vanj ravnanje z zgorelim gorivom in njegovo skladiščenje. Pri elektrarnah na premog in nafto spada v končni del gorivnega cikla zadrževanje žvepovega dioksida (SO<sub>2</sub>), nezgorelega premoga ter v idealnem primeru skladiščenje CO<sub>2</sub> [3], da bi se izognili izpustu v ozračje. Vendar ta tehnologija zahteva še precej raziskav, ker učinki dolgoročnega skladiščenja CO<sub>2</sub> sedaj še niso znani. V končni del gorivnega cikla spada tudi razgradnja (dekomisija) elektrarne. Začetni in končni del gorivnega cikla neizogibno povzročata izpust CO<sub>2</sub>. Realistično lahko razpravljamo o prednostih in pomanjkljivostih določenega procesa za proizvodnjo elektrike le ob oceni celotnega življenjskega cikla.

Količino CO<sub>2</sub>, izpuščeno na 1 kWh proizvedene elektrike, včasih imenovano »ogljčni prstni odtis«, lahko izračunamo kot stranski produkt analize življenjskega cikla [4]. Dobljeni rezultati so odvisni od vrste elektrarne in dajejo razpon vrednosti, ki so na sliki 2 za razna goriva prikazani kot pari stolpcev.

▼ **Slika 3:** Ledenik Pasterza z Velikim Klekom (Großglockner, 3798m) v ozadju (vir [11])



▲ **Slika 4:** Koncentracija CO<sub>2</sub> (ppm) v atmosferi tekom zadnjih 10 000 let; vstavljeni graf: po letu 1750 (vir: [10])

Druge študije uporabljajo različne utežne faktorje in pridejo do rahlo drugačnih vrednosti. Izračun z globalnim emisijskim modelom za integrirane sisteme nemškega Ekološkega instituta [6] da naslednje vrednosti izpuščenega CO<sub>2</sub>: premog približno 1000 g/kWh, kombiniran plinski/parni cikel približno 400 g/kWh, jedrska energija 35 g/kWh, vodna energija 33 g/kWh in vetrna energija 20 g/kWh (povzeto po [7]). Te vrednosti verjetno odražajo položaj v Nemčiji in najbrž niso tipične za druge države [8]. Francija npr. proizvede 79% svoje elektrike iz jedrske energije (Nemčija 31%) in ima zato nižje izpuste CO<sub>2</sub> kot Nemčija. Tudi če sprejmemo vrednosti iz [4], elektrarna na premog izpušča 29 do 37-krat več CO<sub>2</sub> kot jedrska elektrarna. To pomeni, da jedrska proizvodnja elektrike (31,0% od 3,2 PWh) prihrani 990 do 1270 milijonov ton izpustov CO<sub>2</sub> vsako leto, medtem ko vsi obnovljivi viri skupaj (14,7% od 3,2 PWh) prihranijo manj kot pol tega. Prihranek zaradi jedrske energije znaša več kot 704 milijonov ton

CO<sub>2</sub>, ki jih letno sprostijo vsi osebni avtomobili v Evropi (4,4 Tkm/leto [2], 1 Tkm = 1 Terakilometer = 1 milijon milijonov km; 160 g/km [9]). V Evropi bi bila nadomestitev jedrske proizvodnje elektrike s proizvodnjo iz fosilnih goriv ekvivalentna več kot podvojitvi izpustov vseh evropskih avtomobilov. Svetovni izpusti CO<sub>2</sub>, približno 28 milijard ton [3], bi se povečali za 2,6 do 3,5 milijard ton na leto, če bi jedrsko gorivo nadomestili s fosilnim gorivom.

Navedeni primeri analize življenjskega cikla nedvoumno kažejo, da je prispevek jedrske energije k izpustom toplogrednih plinov zanemarljiv ter da je ta rezultat neodvisen od stališča do jedrske energije, ki ga je zavzela institucija, ki je izvedla analizo.

## Klimatske spremembe

Od začetka industrializacije svet doživlja naraščanje povprečne temperature, ki je skoraj zanesljivo posledica človekove ojačitve naravnega učinka tople grede zaradi povečanih izpustov toplogrednih plinov [10]. Dokazi za ta porast temperature vključujejo pospešeno taljenje ledenikov (slika 3), področij permafrosta in arktičnega lednega pokrova.

V istem obdobju je koncentracija antropogenih toplogrednih plinov v ozračju, med katerimi največ prispeva ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), narasla na raven, ki ni bila dosežena stotisoče let. Slika 4 kaže razvoj koncentracije CO<sub>2</sub> v zadnjih 10.000 letih. Znanstveniki soglašajo, da bo imelo nadaljnje naraščanje koncentracije CO<sub>2</sub> v ozračju pogubne učinke na življenje na Zemlji [10, 12]. Zatorej je nujno obvladati povečano sproščanje toplogrednih plinov, ki izvirajo predvsem iz zgorevanja fosilnih goriv, kot je bilo sporazumno določeno v Kjotskem protokolu [13].

## Primarni viri energije v svetu

Scenariji o prihodnjih primarnih virih energije (ti so različni od virov električne energije) so bili predmet

mnogih podrobnih študij. Scenarij trajnostnega razvoja v študiji IEA/OECD (International Energy Agency/Organisation for Economic Cooperation and Development) [14] napoveduje naraščanje, ki ga prikazuje Slika 5 v Gtoe (1 Gtoe = ekvivalent 1 milijarde ton nafte = 11,63 PWh), medtem ko bo svetovno prebivalstvo naraslo z današnjih 6,5 milijard na ocenjenih 8,7 milijard v letu 2050. Vsi sedanji viri energije bodo morali povečati svoje prispevke, da bi lahko zadovoljili povečano povpraševanje po energiji. Po letu 2030, ko se bo prispevek fosilnih virov energije začel zmanjševati, kot to kaže Slika 5, bo potrebno vedno bolj izkoriščati jedrsko energijo, biomaso in druge obnovljive vire energije (vodno, vetrno, geotermalno). Po podatkih IEA »World Energy Outlook, 2004« [16] bodo do leta 2030 zahteve (povpraševanje) po energiji ter z energijo povezani izpusti CO<sub>2</sub> naraščale približno za 1,7% na leto.

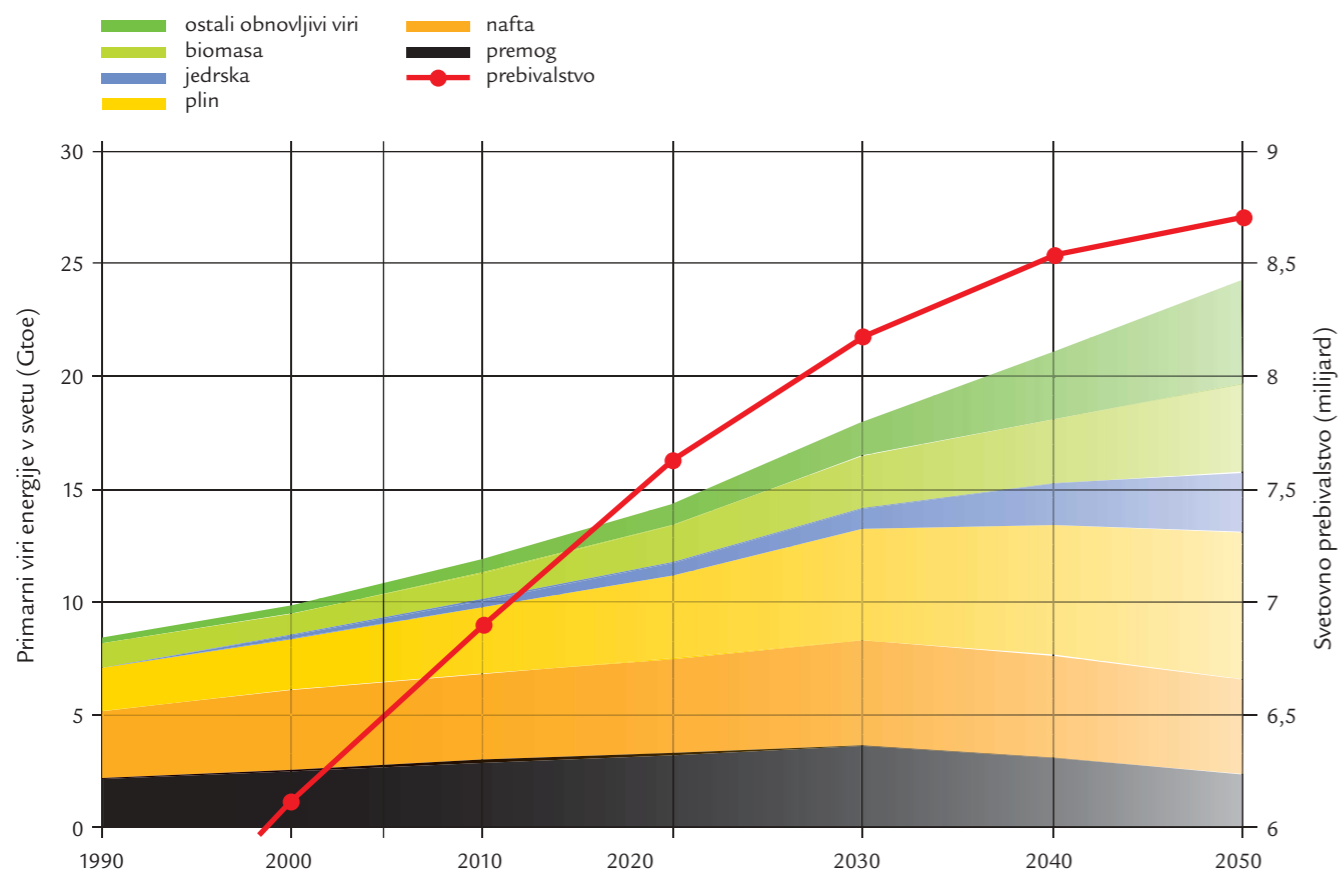
Zavedati se moramo, da je glavni obnovljivi vir elektrike vodna energija (slika 1), prispevka katere v Evropi v predvidljivi prihodnosti ni mogoče bistveno povečati; enako velja tudi za geotermalne izvore

[17]. V Evropi so bila od leta 1990 v velikem številu zgrajena polja vetrnic, vendar je težko razumeti, kako bi njihova proizvodnja v bližnji prihodnosti lahko nadomestila proizvodnjo elektrike iz plina, nafte in premoga (skupno 52,9%) ali jedrske energije (31,0%); letni prirastek, kot je mogoče sklepati iz slike 5, ni niti približno dovolj velik. Potemtakem je potrebno izkoriščati vse razpoložljive vire energije, da bi lahko zadovoljili naraščajoče potrebe.

Najnovejši ambiciozen načrt EU zmanjšanja izpustov CO<sub>2</sub> za 20% (glede na nivo leta 1990) do leta 2020 [18] se zanaša na bistveno zmanjšanje izpustov v transportnem sektorju, implicitno pa tudi na mnogo hitrejšo rast fotovoltaičnih in vetrnih polj. Vendar pa bi se morala npr. proizvodnja elektrike z vetrnimi turbinami povečati za faktor 17, da bi se izenačila s proizvodnjo jedrske elektrike. Ni jasno, kako bi lahko tako rast dosegli do leta 2020. Ta

▼ Slika 5:

manjka opis



račun niti ne upošteva pričakovanega 1,7% naraščanja porabe vsako leto. Razen tega bi potrebovali naprave za skladiščenje energije, ki bi lahko zagotavljale od vremena neodvisno obremenitev. Takih naprav sedaj še ni na razpolago. Zato je cilj, da bi jedrsko proizvodnjo elektrike v celoti nadomestili z obnovljivimi viri, vprašljiv, če ne nerealističen (glej tudi [12]). Uresničitev načrta o zmanjšanju izpustov CO<sub>2</sub> v EU je zato močno odvisna od razpoložljivosti elektrike iz jedrskih elektrarn.

Nadomestitev jedrskih elektrarn z elektrarnami na premog ni prava izbira, ker bi bistveno povečala svetovne izpuste CO<sub>2</sub>. Obnovljivi viri ne bodo rasli dovolj hitro, da bi v bližnji prihodnosti lahko nadomestili jedrsko energijo. Da bi lahko zadostili naraščajočim potrebam po električni energiji in izpolnili cilj EU o zmanjšanju izpustov CO<sub>2</sub> ter se izognili potencialno katastrofalnim spremembam klime, prava izbira ni jedrska energija *ali* obnovljivi viri, temveč jedrska energija *in* obnovljivi viri.

## 2. Proizvodnja jedrske energije danes

Jedrska energija se že uporablja za proizvodnjo elektrike v velikem merilu in sedaj sloni na cepitvi urana-235 (U-235) ter plutonija-239 (Pu-239) v jedrskih elektrarnah (reaktorjih). Ustreza približno 5% svetovne proizvodnje primarne energije, daje približno 16% (2,67 PWh) svetovne elektrike [19] in prihrani 2,6 – 3,5 milijard ton izpustov CO<sub>2</sub> na leto. Ob uporabi novih rešitev, ki jih bomo omenili v nadaljevanju, je jedrska energija sposobna še naprej ostati eden glavnih virov energije, tudi s pomočjo naprav, ki »sežigajo« jedrske odpadke ter istočasno proizvajajo energijo, in inherentno varnih konceptov reaktorjev. V tem trenutku (31. maj 2007) obratuje širom sveta 435 jedrskih elektrarn, od tega 196 v Evropi [19]. Uporabljajo se različni tipi reaktorjev: 264 tlačnovodnih reaktorjev (PWR), 94 vrelnih reaktorjev (BWR), 43 težkovodnih reaktorjev (PHWR ali CANDU), 18 plinsko

hlajenih reaktorjev (AGR & Magnox); poleg tega v Rusiji obratuje še 11 lahkovodnih grafitnih reaktorjev (RBMK) in eden v Litvi; v Franciji, Rusiji in na Japonskem pa štirje hitri oplodni reaktorji (FBR) [19]. V gradnji, večinoma v vzhodnoevropskih in azijskih državah, je še 37 novih enot s skupno močjo 32 GW.

Reaktorji v Evropi, ki že dobavljajo električno energijo v omrežje in ki so v gradnji ali načrtovani, so navedeni v tabeli 1 (črka »e« se nanaša na električno moč).

Nekaj elektrarn (predvsem v vzhodno evropskih državah) bo povečalo moč, nekaj pa podaljšalo življenjsko dobo. Nekatere države (Belgija, Nemčija, Nizozemska, Švedska) načrtujejo postopno ukinjanje jedrske energije, medtem ko je v nekaterih (Avstrija, Danska, Grčija, Irska in Norveška) jedrska energija zakonsko prepovedana.

Položaj na Daljnem Vzhodu, Jugovzhodni Aziji in Srednjem Vzhodu je precej drugačen: obratuje 90 reaktorjev, predvidena je znatna širitev, posebej na Kitajskem, v Indiji, Japonski in Republiki Koreji [19].

Jedrske elektrarne dobavljajo 16% svetovne elektrike; so glavna opora evropske proizvodnje, kjer dajejo 31% elektrike. V Evropi je v gradnji le nekaj novih jedrskih elektrarn, medtem ko je predvideno bistveno povečanje jedrske elektrike v Južni Aziji in Daljnem Vzhodu.

## 3. Pomisleki

### Tveganja in varnost

Naše vsakdanje življenje vsebuje nevarnosti, ki so vsa povezana z določenimi tveganji. Enako velja za proizvodnjo energije. Odkar je človeštvo odvisno od energije, je potrebno ovrednotiti tveganja, ki spremljajo razne vire energije, če hočemo presoditi

	Proizvodnja jedrske elektrike 2006		Obratujoči reaktorji maj 2007		Reaktorji v gradnji maj 2007		Planirani reaktorji maj 2007	
	TWh	%e	Št.	Mwe	Št.	MWe	Št.	MWe
Belgija	44,3	54	7	5728	0	0	0	0
Bolgarija	18,1	44	2	1906	0	0	2	1900
Češka rep.	24,5	31	6	3472	0	0	0	0
Finska	22,0	28	4	2696	1	1600	0	0
Francija	428,7	78	59	63473	0	0	1	1630
Litva	8,0	69	1	1185	0	0	0	0
Madžarska	12,5	38	4	1773	0	0	0	0
Nemčija	158,7	32	17	20303	0	0	0	0
Nizozemska	3,3	3,5	1	485	0	0	0	0
Romunija	5,2	9,0	1	655	1	655	0	0
Rusija	144,3	16	31	21743	3	2650	8	9600
Slovaška	16,6	57	5	2064	0	0	2	840
Slovenija	5,3	40	1	696	0	0	0	0
Španija	57,4	20	8	7442	0	0	0	0
Švedska	65,1	48	10	8975	0	0	0	0
Švica	26,4	37	5	3220	0	0	0	0
Ukrajina	84,8	48	15	13168	0	0	2	1900
Zdr. kralj.	69,2	18	19	10982	0	0	0	0
<b>Evropa</b>	<b>1194,4</b>	<b>35,4</b>	<b>196</b>	<b>169966</b>	<b>5</b>	<b>4905</b>	<b>15</b>	<b>15870</b>

◀ **Tabela 1:**  
Evropski  
energetski  
reaktorji [19]

njihove prednosti. Znanstveniki so razvili orodja za kvantificiranje nivoja tveganja.

Paul Scherrer-Institute v Villigen v Švici je npr. izdelal primerjalno analizo tveganja [20], ki je bila osredotočena na hude nesreče, povezane z energijo, v letih 1969 – 2000. Eden od rezultatov je prikazan na Sliki 6, ki navaja število takojšnjih žrtev na gigavatno leto elektrike (ordinata je v logaritmičnem merilu). Vendar pa je potrebno v primeru černobilske nesreče upoštevati dolgoročne posledice. Leta 2005 jih je preiskala študijska skupina Svetovne zdravstvene organizacije (WHO), ki jo je sestavljalo 8 specializiranih agencij Združenih narodov kot tudi vlade Belorusije, Ruske federacije in Ukrajine. Poročilo navaja 50 takojšnjih žrtev med reševalci, ki so umrli zaradi akutnega radiacijskega sindroma, ter 9 otrok, ki so umrli zaradi raka na ščitnici. Vprašanje celotnega števila smrti v prihodnosti, ki so vzročno povezane

s sproščanjem znatne količine radioaktivnih snovi v okolje, je zapleteno in je tudi podrobno obdelano v poročilu WHO [21] (Op. prev.: Na tem mestu povzemamo le glavno ugotovitev, da lahko med približno 300.000 ljudmi, ki so bili izpostavljeni povišanemu sevanju, v naslednjih 20 letih pričakujemo do 4000 dodatnih smrti zaradi raka. To število pomeni približno 3% povečanje raka-vih obolenj, ki jih v taki populaciji pričakujemo iz drugih, »naravnih« vzrokov, zato tega povečanja ne bo možno statistično potrditi.).

Medtem ko je mogoče preiskati nesreče v preteklosti, pa je težko oceniti možne vplive nesreč, ki se utegnejo zgoditi v prihodnosti. Tako oceno tveganja je izvedel B. L. Cohen, ki je za kvantifikacijo tveganja uvedel posebno veličino in jo poimenoval »skrajšanje pričakovanega življenja« (loss of life expectancy) [22]. Ta znanstveno osnovana analiza kaže, da je tveganje pri proizvodnji elektrike iz

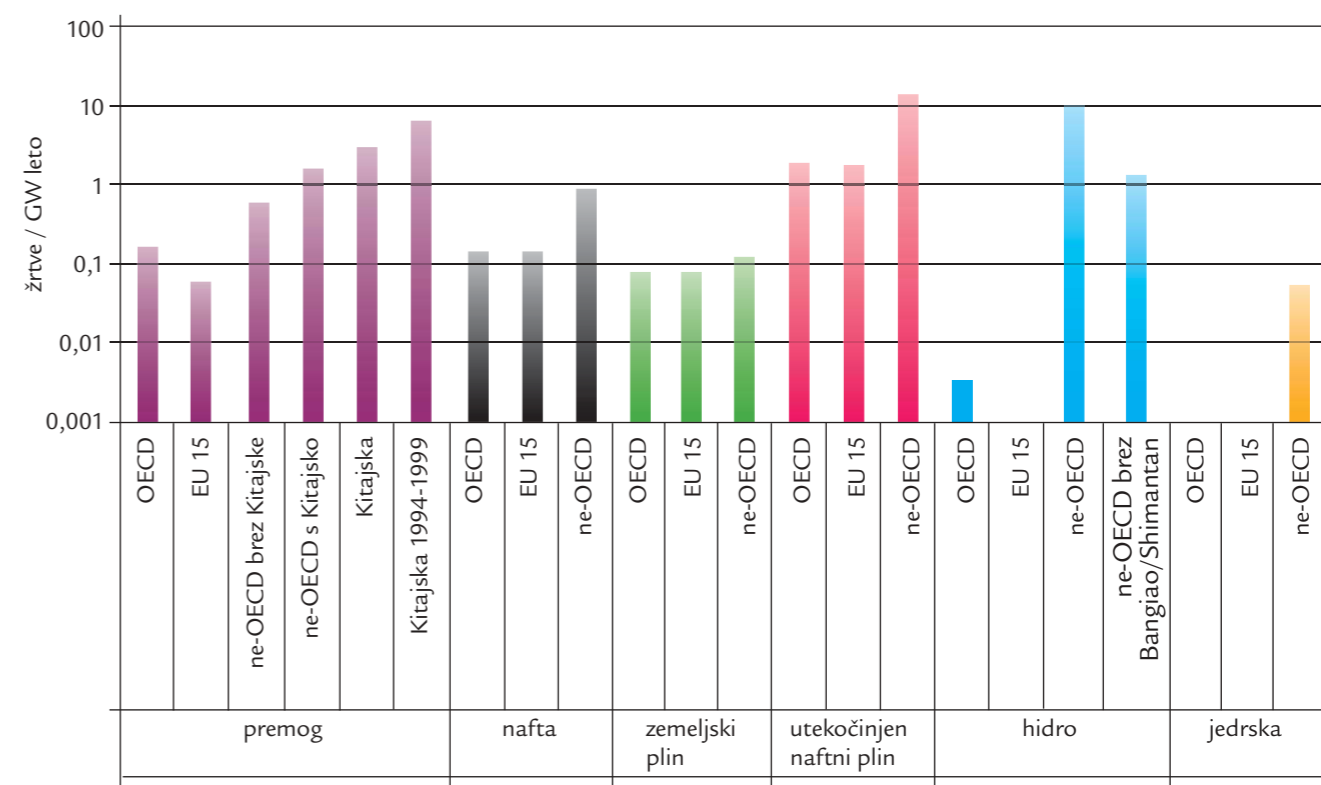
jedrskije daleč manjše od drugih tveganj v vsakdanjem življenju [22].

Taka objektivna ocena relativnega tveganja se mora kosati z dejstvom, da pogosto obstaja bistvena razlika med zaznanim tveganjem nekega dogodka in med možnostjo, da se ta dogodek dejansko zgodi. Majhno tveganje velike nesreče zaznavamo drugače kot veliko tveganje majhne nesreče, čeprav utegne biti celotno število žrtev na leto v obeh primerih enako. To še posebno drži v primeru, kako splošna javnost zaznava jedrsko energijo, ki je povezana z radioaktivnostjo.

Radioaktivnost – spontana sprememba v jedru atoma, katero spremlja sevanje alfa, beta ali gama (skupno jih imenujemo ionizirajoče sevanje) je naravni pojav, ki je obstajal že davno pred nastankom našega planeta. Radioaktivne elemente kot sta torij in uran najdemo v raznih predelih sveta. V zemeljski skorji je približno 7,2 mg torija [23] in 2,4 mg urana [24] na kg skorje. Oba elementa radioaktivno razpadata, njuna produkta sta radij in radon. Radon je plemenit plin, ki uhaja iz rudonosnih depositov in predstavlja posebno izrazit vir

naravnega sevanja v bližini teh depositov. Naravna radioaktivnost je prisotna tudi v flori in favni. Npr., radioaktivni ogljik-14 (C-14), ki z jedrskimi reakcijami neprestano nastaja v zemeljskem ozračju pod vplivom kozmičnega sevanja, vstopa v biosfero in prehrabno verigo vseh živih bitij. Razen tega kosti vseh živali in ljudi vsebujejo element kalij (K). Njegov radioaktivni izotop K-40 (njegov delež je 0,0117%) ima življenjsko dobo, ki je daljša od starosti Zemlje. V telesu povprečnega človeka starosti

▼ **Slika 6:** Primerjava normaliziranega števila žrtev, povezanih z izkoriščanjem raznih virov energije: osnova so podatki o hudih nesrečah v državah OECD, državah izven OECD in EU 15 (Evropske zveze, ko je imela 15 članic), ki so se zgodile med leti 1969 in 2000. Za Kitajsko so bili na razpolago le podatki iz letopisa premogovne industrije v letih 1994-1999. V primeru nesreč zaradi izkoriščanja vodne energije v ne-OECD državah sta navedeni vrednosti z in brez upoštevanja največje nesreče, ki se je kadarkoli zgodila v Kitajski in je sama terjala 26 000 žrtev. V grafu so prikazane samo neposredne žrtve (glej [20]).



25 let in teže 70 kg se vsako sekundo zgodi približno 9000 radioaktivnih razpadov [25].

Pogosto se pojavljajo trditve, da jedrske elektrarne izpuščajo radiaktivne snovi v količinah, ki so potencialno nevarne. Mnoge države imajo zakonodajo, ki določa zgornje meje izpustov (emisij) ionizirajočih snovi z izpušnim zrakom in vnose (imisije) v okolje (npr. Zvezni zakon o nadzoru emisij v Nemčiji [26]), katere izpolnjevanje je strogo nadzorovano. Razen tega je obratovanje tako jedrskih elektrarn kot tudi raziskovalnih reaktorjev urejeno s strogimi predpisi, izpolnjevanje katerih nadzorujejo neodvisne vladne organizacije, ki so pooblaščenice za ustavitev elektrarn v primeru kršitev. Ugotovljeno je, da so emisije in imisije v bližini jedrskih elektrarn v okviru krajevnih fluktuacij naravnega sevanja (naravnega ozadja). Vedeti moramo, da tudi elektrarne na premog ob svojem obratovanju izpuščajo radioaktivne snovi, ker premog vsebuje od 0,005 do 3 mg urana na kg [28]. Urana in produktov njegovega radioaktivnega razpada ni mogoče v celoti zadržati s filtri in so sproščeni v okolje [29].

Druga široko razširjena trditev je, da je levkemija bolj pogosta v bližini jedrskih naprav. Vendar so študije pokazale, da »se lokalne gruče levkemije pojavljajo popolnoma neodvisno od jedrskih naprav« [30], glej tudi [31]. Število rakavih obolenj zaradi črnobilske nesreče je preiskala Svetovna zdravstvena organizacija (WHO) [21]. Rezultati so bili zgoraj že diskutirani.

Varnost jedrskih elektrarn je pomemben problem. Uničujoča nesreča v Černobilu je bila povezana s tipom lahkovodnega grafitnega reaktorja (RBMK), ki ga še vedno uporabljajo v Rusiji in Litvi. Taka nesreča se v drugih reaktorjih po svetu ne more zgoditi zaradi drugačne tehnologije. Nadaljnje izboljševanje varnosti je ena od gonilnih sil razvoja reaktorjev naslednje generacije. Konstruirani so tako, da je ali stalitev sredice fizikalno nemogoča ali pa je najslabši možni scenarij del projektne osnove reaktorja, tako da so posledice omejene na zadrževalni hram reaktorja ter ne vplivajo na okolje.

Sistem zadrževalnega hrama reaktorja je projektiran tudi tako, da lahko vzdrži udarec kateregakoli letala.

## Odpadki

V jedrskih elektrarnah v svetu izpraznijo iz reaktorjev 10.500 ton zgorelega goriva letno. Zgorelo gorivo je potrebno ali predelati ali izolirati od okolja za stotisoče let, da ne bi škodovalo biosferi. Vsa radioaktivna jedra v odpadkih bodo sčasoma razpadla v stabilna jedra. Različni nuklidi v radioaktivnih odpadkih bi v primeru zaužitja ali vdihavanja lahko različno škodovala živim bitjem glede na svoje značilnosti razpadanja, hitrosti razpadanja in časa zadrževanja. To nevarnost kvantificiramo kot radiotoksičnost – merilo njihove škodljivosti. Primeri nuklidov z visoko radiotoksičnostjo so dolgoživi izotopi plutonija in manjšinskih aktinidov (MA), predvsem neptunija, americija in kirija. Kratkoživi fisijski produkti pa so v splošnem manj radiotoksični, njihova radiotoksičnost se s časom tudi hitro zmanjšuje. Radioaktivni odpadki ne nastajajo samo pri obratovanju in razgradnji jedrskih elektrarn, temveč tudi v nuklearni medicini in znanstveno-raziskovalno laboratorijih. Odlaganje teh nizko in srednje radioaktivnih odpadkov v primernih odlagališčih ni velik problem in se izvaja v večih državah. Opozoriti je potrebno, da so vse evropske države, v katerih obratujejo jedrske elektrarne (glej Tabela 1) in druge, ki uporabljajo radioaktivne snovi ali ionizirajoče sevanje, podpisale »Skupno konvencijo o varnosti upravljanja zgorelega goriva in varnosti upravljanja radioaktivnih odpadkov« Mednarodne agencije za atomsko energijo [33].

Vendar pa je dolgoročno ravnanje z zgorelim gorivom pomembna zadeva. Kratkoročno je ravnanje z zgorelim gorivom potekalo varno od najzgodnejših dni jedrskih reaktorjev. Po odstranitvi iz reaktorja gorivo skladiščijo pod vodo na sami lokaciji, da razpadejo kratkoživa radioaktivna jedra. Potem zgorelo gorivo ali predelajo, tako da uran in plutonij kemično odstranijo in ponovno uporabijo za sveže gorivo, ali pa v odprtem gorivnem ciklu (z enkratnim prehodom skozi reaktor) zapakirajo za

dolgoročno odlaganje globoko pod zemljo. V odprtem gorivnem ciklu je potrebno hraniti gorivo vsaj 170.000 let, da se njegova radiotoksičnost zniža na raven urana, iz katerega je bil izdelan. Odstranitev 99,9% plutonija in urana zmanjša ta čas na 16.000 let. Prihodnje moderne tehnologije recikliranja, ki odstranijo tudi manjšinske aktinide (MA) bi skrajšale varen čas skladiščenja preostalih fisijskih produktov na malo več kot 300 let [34]. Izločene MA bi »sežgali« v posebnih napravah, o katerih bo govorila kasneje, in jih tako transmutirali v kratkožive fisijske produkte.

Glavni cilj globokih podzemnih odlagališč je dolgoročno ločitev od vode. Možne lokacije za taka odlagališča so v večih državah že našli in podrobno preiskali njihovo dolgoročno geološko varnost (npr. ravnanje z zgorelim gorivom finskega reaktorja v gradnji v Olkiluotu [35]). Ta način odlaganja vsaj začasno reši problem odpadkov ter v nekaterih primerih ne izključuje ponovne pridobitve tega materiala za predelavo v prihodnosti [35], [36].

## Širjenje jedrskega orožja in grožnje skrajnežev

Ne-mirnodobska uporaba cepljivega materiala je izredno pomembna zadeva [37]. Ko govorimo o tem problemu, je potrebno ločiti med izdelavo jedrskih konic s strani velesil in izdelavo enostavnih bomb s strani skrajnežev (ekstremistov). Jedrske bojne glave, ki jih izdelujejo jedrske sile, so iz visoko obogatene urana (HEU = Highly Enriched Uranium) ali plutonija orožarske čistoče. Slednjega ne pridobivajo v jedrskih elektrarnah, temveč v posebej prirejenih reaktorjih, ki dajejo predvsem Pu-239 [38]. Nizko obogaten uran (LEU = Low Enriched Uranium), ki se uporablja kot gorivo v jedrskih elektrarnah, ni primeren za eksplozivne naprave. Plutonij, izločen iz zgorelega goriva, nima prave izotopske sestave za enostavno in učinkovito izdelavo jedrskih glav. Zatorej je potrebno posebej poudariti, da plutonij iz jedrskih elektrarn ni primeren za proizvodnjo jedrskih konic. Možnost, da določena država razvije vojaški jedrski program, ni odvisna enostav-

no samo od prisotnosti jedrskih elektrarn, ampak tudi od dosegljivosti predelave (reprocesinga) in/ali naprav za obogatitev.

Uporaba cepljivih materialov s strani skrajnežev je poseben problem. Razpravo o tej grožnji je mogoče najti npr. v [39]. Cepljiv material, kemično izločen iz zgorelega jedrskega goriva, bi skrajneži v načelu lahko uporabili za jedrsko napravo z relativno majhno eksplozivno močjo, morda nekaj kiloton TNT, ki pa bi sprostila v okolje znatno količino radioaktivnih snovi (glej [41]). Mogoče si je tudi zamisliti, da bi uporabili konvencionalno bombo za uparitev palice zgorelega goriva in razpršitev radioaktivnih snovi. Mednarodna agencija za atomsko energijo (IAEA) natančno spremlja gibanje in nahajanje cepljivih materialov, da bi preprečile taka dejanja (glej tudi [42]). Predelava jedrskega goriva zahteva veliko industrijsko napravo in je proces vsekakor mogoče tesno nadzorovati s stališča varovanja jedrskega materiala in tako učinkovito preprečevati njegovo odtujitev. V predvidljivi prihodnosti bodo nekateri reaktorji IV. generacije proizvajali mnogo manj plutonija v primerjavi s sedanjimi reaktorji (glej poglavje 5) [43].

Naslednja grožnja, ki je ni mogoče prezreti, je možnost, da bi ekstremistične skupine pridobile jedrsko orožje neposredno iz ukinjenih arzenalov jedrskega orožja. Jasno je, da v tem primeru grožnje skrajnežev nimajo nobene zveze z miroljubno uporabo jedrske tehnologije.

Kot vsak vir energije tudi jedrska energija ni brez nevarnosti. Varnost jedrskih elektrarn, odlaganje odpadkov, širjenje jedrskega orožja in grožnje skrajnežev so predmet resne zaskrbljenosti (pomislekov). Sprejemljivost s tem povezanih tveganj je stvar presoje, ki mora upoštevati specifična tveganja drugih virov energije. Ta presoja mora biti racionalna in na osnovi znanstvenih ugotovitev, odprte razprave o dokazih ter primerjave z drugimi viri energije.

## 4. Gorivni cikli (krogi)

Večina sedanjih reaktorjev deluje na osnovi cepitve U-235, ki poteka s pomočjo termičnih (počasnih) nevtronov; odtod tudi izvira izraz termični reaktorji. Enak proces se zgodi s Pu-239 in U-233, ki nastane iz iz jeder U-238 in torija-232 (Th-232) ob zajetju nevtrona. Za razliko od tega, jedrsko verižno reakcijo v hitrih reaktorjih vzdržujejo hitri (visoko energijski) nevtroni. Med termične reaktorje spadajo tudi reaktor na staljeno sol (glej poglavje 5) in reaktorji tipa CANDU. Slednji so hlajeni in moderirani s težko vodo in lahko delujejo na naravni uran. Oboji lahko oplodijo dovolj U-233 za svoje stalno delovanje, čeprav je potrebno v rednih intervalih odstranjevati fisijske produkte. Hitri oplodni reaktorji lahko oplodijo celo več goriva (plutonija), kot ga sami porabijo. Poleg delitve po energiji nevtronov lahko reaktorje razlikujemo glede na njihove gorivne cikle: gorivni cikel z enkratnim prehodom (odprt cikel, uporabljajo ga npr. ZDA in tudi Slovenija) in zaprt cikel (uporabljajo ga npr. Franciji). O obeh bomo razpravljali posebej, ker imata vsak svoje specifične probleme in prednosti. Najprej pa je potrebno obravnavati vprašanje zaloga uranove rude.

### Zaloge urana

Konvencionalne zaloge urana so ocenjene na 14,8 milijonov ton. Med temi je za 4,7 milijone ton identificiranih virov. Ti so dosegljivi brez težav in jih je mogoče izkoriščati pri ceni manj kot 130 US \$/kg urana [44, 45]. Razlika približno 10 milijonov ton je ocena, izvirajoča iz podrobnih preiskav in geološkega znanja, ki nakazuje verjetna geografska področja. Ta številka je verjetno podcenjena, ker je samo 43 držav poročalo o tej kategoriji.

Drugi viri obsegajo nekonvencionalne zaloge urana (uran v nizki koncentraciji) in druga potencialna jedrska goriva (npr. torij). Večina nekonvencionalnih zaloga urana je povezanih s fosfati (približno 22 milijonov ton), obstajajo pa tudi drugi potencialni viri, kot npr. morska voda in črni skrilavec. Ti viri bodo verjetno prišli v poštev, če bo cena urana narasla.

Torija je veliko, skupno več kot 4,5 milijona ton [46], vendar v tej številki manjkajo podatki mnogih držav z možnimi nahajališči torija.

Številko 4,7 milijona ton identificiranih zaloga moramo primerjati z letnimi potrebami približno 67 tisoč ton urana v letu 2005 [19]. Svetovne potrebe po reaktorskem uranu bodo predvidoma narasle na 82 do 101 tisoč ton v letu 2025. Potrebe severno-ameriških in zahodno-evropskih regij bodo po pričakovanjih ostale precej konstantne ali pa se bodo rahlo zmanjšale, medtem ko bodo drugod po svetu narasle [44]. Iz teh ocen sledi, da identificirane zaloge urana zadoščajo za pogon reaktorjev v odprtem ciklu za naslednjih 50 let. Če upoštevamo konvencionalne vire (približno 10 milijonov ton) in nekonvencionalne vire (približno 22 milijonov ton), ki bodo izkoriščane v primeru potreb, bodo trajale rezerve uranove rude za uporabo v odprtem ciklu več sto let. V primeru zaprtega cikla zadoščajo rezerve urana za tisoče let (glej spodaj).

### Gorivni cikel z enkratnim prehodom ali odprt cikel

Po končanih postopkih rudarjenja uranovo rudo spremenijo v uranov heksafluorid  $UF_6$ , ki je osnovna surovina za postopek obogatitve. Z njim povečajo koncentracijo cepljivega U-235 do 4,6%. Koncentracija U-235 v naravnem uranu (0,72%) je prenizka za uporabo v večini reaktorjev, razen v reaktorjih tipa CANDU, ki lahko obratujejo na naravni uran. Heksafluorid obogatene urana nato spremenijo v uranov oksid  $UO_2$ , iz katerega izdelajo gorivne tablete, ki so vsebina gorivnih palic. Te palice ostanejo v reaktorju do približno 4 leta. V tem času nadzorovana verižna reakcija jedrskih cepitev sprošča energijo, ki se spremeni v električno energijo. Vsaka stopnja te proizvodnje je sama zase zaključen industrijski proces.

Gorivnih palic v odprtem procesu ne predelujejo. Vsi manjšinski aktinidi in še posebej plutonij ostanejo znotraj palic v taki obliki, da ga ni mogoče uporabiti za enostavno in učinkovito proizvodnjo

orožja. Ta inherentna odpornost proti širjenju jedrskega orožja je velika prednost odprtega gorivnega cikla. Ostale prednosti tega načina obratovanja lahko najdemo v [47].

Glavna pomanjkljivost tega procesa je nastajanje radioaktivnih odpadkov, ki jih je potrebno hraniti sto tisoče let, da se njihov radiotoksičnost zmanjša na raven uranove rude. Ta cikel zapravlja uran in cepljivi plutonij. Npr., v sedanjih lahkovodnih reaktorjih je začetna obogatitev 3,3% ter v zgorelem gorivu še vedno 0,86% [48], medtem ko je koncentracija U-235 v naravnem uranu 0,72%.

### Zaprt cikel

Procesi v reaktorju zaprtega cikla so večinoma enaki kot v odprtem ciklu. Glavna razlika je kemična predelava (procesiranje) zgorelega goriva (proces PUREX = Plutonium-Uranium Recovery by Extraction). Plutonij in uran ločijo od zgorelega goriva za ponovno uporabo kot mešano oksidno gorivo (MOX = Mixed Oxide) [49]. Ekstrakcijo urana in plutonija iz zgorelega goriva rutinsko iz-

vajajo v posebnih predelovalnih tovarnah v krajih La Hague (Francija), Sellafield (Anglija), Rokkasho (Japonska) in Majak (Rusija). Manjšinskih aktinidov (MA) ne izločijo in ti predstavljajo glavni sestavni del dolgoživih radioaktivnih odpadkov, ki jih je potrebno varno hraniti (glej zgoraj: Odpadki), ali sežgati/transmutirati (glej spodaj: Perspektive ravnanja z zgorelim gorivom). Seveda je ločevanje obsežen proces, o tveganju katerega je bilo govora zgoraj (glej: Širjenje jedrskega orožja in grožnje skrajnežev). V trenutno obratujočih napravah so izločeni izotopi pod strogim nadzorom mednarodnih in nacionalnih teles, ki spremljajo in beležijo njihovo nahajališče.

Prednost zaprtega cikla je mnogo manjša poraba uranove rude. Recikliran material je mogoče uporabiti v hitrih oplodnih reaktorjih, ki so glede izrabe urana stokrat bolj učinkoviti. S sedaj znanimi zalogami uranove rude bi fisiski reaktorji lahko obratovali 5000 let namesto nekaj sto let v odprtem ciklu. Manjše potrebe po uranovi rudi bodo zmanjšale

▼ **Tabela 2:** Reaktorji IV generacije in nekatere od njihovih posebnih lastnosti [43]

GFR	Plinsko hlajen hitri reaktor Gas Cooled Fast Reactor	Učinkovito upravljanje z aktinidi, zaprt gorivni cikel. Dobavlja lahko elektriko, vodik ali toploto.
LFR	Hitri reaktor, hlajen s svincem Lead Cooled Fast Reactor	Majhna, tovarniško zgrajena naprava, zaprt cikel z zelo dolgim intervalom menjave goriva (15 do 20 let). Prevozen na lokacije, kjer je potreben za proizvodnjo energije, pitne vode ali vodika. Zamišljeni so tudi večji LFR.
MSR	Reaktor na staljeno sol Molten Salt Reactor	Prirejen za učinkovito sežiganje Pu in MA, izdelava goriva zaradi tekočega goriva odpade, inherentno varen. Najvišje uvrščen po trajnostnih kriterijih, najbolj primeren za torijev cikel.
SFR	Hitri reaktor, hlajen z natrijem Sodium Cooled Fast Reactor	Učinkovito upravljanje z aktinidi, pretvorba oplodnega U, zaprt cikel.
SCWR	Reaktor, hlajen z nadkritično vodo Super Critical Water Cooled Reactor	Učinkovita proizvodnja elektrike, možno upravljanje aktinidov, odprt cikel najenostavnejše oblike, možen tudi zaprt cikel.
VHTR	Zelo visoko temperaturni reaktor Very High Temperature Reactor	Odprt cikel urana, proizvodnja elektrike in procesne toplote za petrokemično industrijo, termokemična proizvodnja vodika.



okoljske učinke rudarjenja in poleg tega še sprostile geopolitične ter ekonomske konflikte glede dobav uranove rude. Drug možen zaprt gorivni cikel sloni na toriju, ki ga je 3 – 4 krat več kot urana [49].

### Perspektive ravnanja z zgorelim gorivom

Alternativa zelo dolgotrajnemu skladiščenju zgorelega goriva je njegovo sežiganje v namenskih reaktorjih ([43], glej spodaj) ali transmutacija dolgoživih izotopov v kratkožive v posebnih pospeševalniških sistemih (ADS = Accelerator Driven Systems). Oba procesa zahtevata učinkovito ločevanje ne samo urana in plutonija, temveč tudi manjšinskih aktinidov. Učinkovitost ločevanja je 99,9%, pričakovana učinkovitost sežiga/transmutacije pa okrog 20%. Zato bo za znatno zmanjšanje količine dolgoživih radioaktivnih snovi [34] potrebno več ciklov ločevanja in sežiga/transmutacije. Po nekaj več kot tristo letih, kar je obdobje, v katerem si lahko zanesljivo zamislimo varno shranjevanje, pade radiotoksičnost zgorelega goriva pod raven urana, iz katerega je bilo izdelano gorivo.

V zadnjih desetletjih so študirali obetavne sheme transmutacije na osnovi pospeševalniških sistemov (ADS) [51]. Ta novi koncept še naprej razvijajo tako v Evropi kot tudi v Aziji. Osnovna ideja je uporaba hibridnega reaktorja: fisijski reaktor je kombiniran z zelo zmogljivim visoko energijskim pospeševalnikom protonov. Pospeševalnik je uporabljen za produkcijo intenzivnega toka nevtronov, ki povzročijo cepitve v tarči iz urana, plutonija in manjšinskih aktinidov. Nevtroni so potrebni za začetek in vzdrževanje procesa cepitve brez verižne reakcije. Načeloma lahko tak hibriden sistem transmutira radioaktivne odpadke v kratkožive fisijske produkte ter istočasno proizvaja energijo.

V 6. Okvirnem programu Evropske komisije je bil začet projekt prve eksperimentalne naprave za demonstracijo izvedljivosti ADS-a. Idejni projekt razvijajo vzporedno s projektom za modularno realizacijo na industrijskem nivoju [52]. Študije obsegajo tudi zanesljivost in ekonomsko konkurenčnost. Taki

hibridni sistemi lahko poleg sežiganja odpadkov znatno prispevajo k proizvodnji energije v velikem merilu po letu 2020. Sistemi ADS tekmujejo s IV. generacijo reaktorjev, ki so projektirani tudi za učinkovito sežiganje MA (za opis IV. generacije reaktorjev glej naslednje poglavje).

Tako jedrski reaktorji za odprt cikel in kot reaktorji za zaprt gorivni cikel proizvajajo energijo na osnovi cepitve težkih jeder (goriva) s pomočjo nevtronov, vendar na različni način ravnaajo z nastalimi odpadki. Sistem z odprtim ciklom je privlačen z vidika fizične varnosti. Sistemi z zaprtim ciklom lahko ponovno uporabijo gorivo iz odpadkov in zato potrebujejo bistveno manj uranove rude.

## 5. Proizvodnja jedrske energije v prihodnosti

### Moderni jedrski reaktorji

Energetski scenariji za prihodnjih 50 let kažejo, da je za proizvodnjo energije ključno ohraniti jedrsko opcijo. Vendar sedanje tehnologije in z njimi povezani gorivni cikli na osnovi U-235 proizvedejo veliko količino potencialno nevarnih odpadkov, medtem ko je pri nekaterih tipih reaktorjev tveganje katastrofalnega dogodka nesprejemljivo visoko. Jedrski industriji v nekaterih evropskih državah močno nasprotujejo zaradi teh varnostnih problemov in povezovanja jedrske energije s černobilsko nesrečo ter jedrskim orožjem.

Kot odziv na to je bila razvita III. generacija reaktorjev. Primer je Evropski tlačnovodni reaktor (EPR), trenutno v gradnji v Olkiluotu na Finskem, ki predstavlja korak naprej glede varnostne tehnologije [35]. Njegova moderna zasnova preprečuje nesreče in zmanjšuje verjetnost poškodb reaktorske sredice. Izboljšano obvladovanje nesreč zagotavlja, da ob izredno malo verjetnem dogodku taljenja sredice vse radioaktivne snovi ostanejo znotraj sistema

zadrževalnega hram ter da so vse posledice nesreče omejene na lokacijo elektrarne. EPR ima tudi izboljšano odpornost proti direktnemu udarcu letala, vključno velikega potniškega reakcijskega letala.

Leta 2001 je več kot 100 strokovnjakov iz Anglije, Argentine, Brazilije, Francije, Japonske, Južne Afrike, Kanade, Koreje, Švice, Združenih držav Amerike, Mednarodne agencije za atomsko energijo ter Agencije za jedrsko energijo OECD začelo delati na definiranju ciljev novih sistemov, identifikaciji najbolj obetavnih konceptov (idej) ter njihovi evalvaciji, obenem pa tudi ugotavljanju potrebne raziskovalne in razvojne potrebe. Do konca leta 2002 je bil rezultat dela opis šestih sistemov in s tem povezanih potreb za raziskave in razvoj [43]. Pri razvoju IV. generacije (GenIV) je velik poudarek na varnosti. Ključna zahteva je izključitev možnosti nesreče, kot je bila černobilska. Razen tega bodi ti reaktorji izboljšali ekonomičnost proizvodnje elektrike, zmanjšali količino jedrskih odpadkov za odlaganje, povečali odpornost proti širjenju jedrskega orožja ter uvedli nove lastnosti, kot npr. možnost proizvodnje vodika za uporabo v transportu [Tabela 2]. Obstaja tudi možnost uporabe torij-uranovega cikla. Njegove prednosti, npr. fizikalna nemožnost proizvodnje plutonija in/ali manjšinskih aktinidov in zatorej za faktor 1000 zmanjšana radiotoksičnost odpadkov v primerjavi z odprtim uranovim ciklom, so obravnavane v nedavno objavljenem članku [53].

Čeprav so še potrebne raziskave, je pričakovati, da bodo nekateri od teh sistemov leta 2030 že obratovali. V najbolj dovršenih gorivnih ciklih, kombiniranih z recikliranjem, zgori velik delež dolgoživih cepljivih snovi, tako da je potrebna osamitev odpadkov skrajšana na nekaj stoletij sto tisočev let.

Prezgodaj je izreči končno razsodbo o relativnih prednosti ADS in GenIV reaktorjev glede na proizvodnjo elektrike in sežiganje odpadkov/transmutacijo, vendar so očitne splošne ugodne lastnosti obeh tipov. Primerjalna študija je razvidna v [54].

### Fuzijski reaktorji

Naslednja opcija za proizvodnjo jedrske energije brez izpustov CO<sub>2</sub> je proces jedrske fuzije (zlivanja). Pomemben korak k uresničitvi fuzije je bila leta 2005 sprejeta odločitev o gradnji reaktorja ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [55] v kraju Cadarache v Franciji. V tem reaktorju se zlivata devterij in tritij, ki tvorita helij-4 in prost nevtron, ki odnese 80% sproščene energije. Helij-4 je neradioaktivni »pepel« fuzijskega procesa. Med obratovanjem fuzijski reaktor iz litija sam pridobiva tritij, ki ga potrebuje kot gorivo. Devterij je izotop vodika in na razpolago v naravi v praktično neomejenih količinah. Svetovne zaloge litija so ocenjene na 12 milijonov ton [56], kar je vsekakor dovolj, da jedrsko fuzijo smatramo za dolgotrajen vir energije. V gradnji fuzijske elektrarne bodo uporabljeni materiali, ki se bodo neizogibno aktivirali z nevtroni, vendar bo njihova aktivnost relativno hitro, v 100 letih, upadla na raven, ki omogoča rokovanje z materiali na delovnem pultu. Izkušnje pri rokovanju s tritijem upravičujejo domnevo, da je vir fuzijske energije zelo varen. Vendar pa bo jedrska fuzija postala znaten vir energije šele kvečjemu v drugi polovici tega stoletja, ker tehnologija fuzijskih reaktorjev potrebuje še znatno izpopolnitev.

Novi koncepti reaktorjev (GenIV) bodo ustrezali strogim kriterijem tako trajnosti in zanesljivosti proizvodnje energije kot tudi varnosti in neširjenja orožja (ne-prolifracije). Jedrska cepitev in zlivanje sta sposobni bistveno prispevati k zadovoljevanju potreb po elektriki v prihodnosti.

## 6. Zaključek

**Naša razglabljanja so nas privedla do sledečih zaključkov:**

- Noben posamezen vir energije sam ne bo mogel izpolniti potreb prihodnjih generacij.
- Jedrska energija zmore in mora pomembno prispevati k naboru virov elektrike.

- V modernih jedrskih reaktorjih, ki so osnovani na preizkušeni tehnologiji in uporabljajo sodobne načine preprečevanja nesreč, vključno s pasivnimi varnostnimi sistemi, je nesreča černobilskega tipa z vsemi svojimi posledicami praktično nemogoča.
- Potrebno je začeti ter nadaljevati obsežne in dolgoročne programe raziskav, razvoja in demonstracijskih naprav (RD&D = Research, Development and Demonstration), ki zajemajo vse možne opcije trajnostne proizvodnje energije. RD&D za določeno opcijo je treba usmeriti k uresničitvi in oceni delujočega demonstracijskega sistema, npr. na osnovi reaktorja IV. generacije.
- Potrebno si je prizadevati za razvoj transmutacije odpadkov z obetavnimi pospeševalniškimi sistemi reaktorjev (ADS) ali IV. generacije reaktorjev. Nujni naslednji koraki so razvoj projekta in demonstracijska naprava.
- Potrebno je proučiti tudi možnost podaljšanja življenjske dobe obstoječih reaktorjev.
- Jedrska opcija naj pomeni upoštevanje proizvodnje energije s fisijskimi in fuzijskimi procesi.
- Glede na dolgo obdobje med demonstracijo in uresničitvijo katerekoli predlagane sheme je mogoče potencial jedrske opcije po letu 2020 presojati samo na osnovi okrepljenih in razširjenih prizadevanj RD&D. Za taka prizadevanja so potrebni usklajeni naporji znanstvenikov in politikov, da bi lahko ocenili dolgoročne varnostne in ekonomske vidike proizvodnje energije.
- Uresničiti je potrebno predlog Evropske komisije maja 2006 o skupni evropski energetske politiki. Cilj te politike je usposobiti Evropo, da se bo soočila z izzivi o preskrbi z energijo v prihodnosti in vplivi tega na rast in okolje [55], ter slediti Zeleni knjigi Evropske komisije glede evropske strategije o varnosti dobave energije [58].
- RD&D program jedrske opcije zahteva tudi podporo za osnovne raziskave v jedrski znanosti in znanosti o materialih, kajti le tako bo mogoče pridobiti izkušnje za sveže tehnološke rešitve.
- Evropa mora ostati vstric z razvojem v projektiranju reaktorjev neodvisno od kakršnekoli odločitve o njihovi gradnji v Evropi. To je pomemben dodaten razlog za investiranje v RD&D jedrskih reaktorjev in je bistven, če hoče Evropa ostati sposobna slediti programom v hitro razvijajočih se državah kot sta Kitajska in Indija, ki sta se izrekli za gradnjo jedrskih elektrarn, ter pomaga zagotavljati varnost reaktorjev z aktivnim sodelovanjem v Mednarodni agenciji za atomsko energijo.
- RD&D je potrebno izvajati v globalnem merilu. Problemi, povezani s trajnostno proizvodnjo jedrske energije, kot so odlaganje odpadkov, varnost, neširjenje jedrskega orožja in družbena sprejemljivost, segajo daleč preko nacionalnih meja.
- Oblikovalci politike in odločevalci morajo spoznati nujnost rešitve problema tople grede v okviru dobro definirane energetske strategije, tako da stimulirajo in podpirajo RD&D, vključujoč jedrsko opcijo. Evropska komisija je to osnovno zamisel že sprejela [59].
- Za družbeno sprejemljivost in podporo je potrebno odgovorno in nepopačeno informiranje o vseh vidikih proizvodnje jedrske energije, ki ga mora spremljati program osveščanja javnosti za boljše razumevanje in presojo tehnoloških tveganj in ocen tveganja v industrijski ekonomiji. Veliko prizadevanja je potrebnega za informiranje splošne javnosti o kratkoročnih in dolgoročnih vidikih varnosti ter ekoloških vplivih različnih tehnologij, ki prispevajo k visoki stopnji razvitosti industrializiranih regij v Evropi. Če naj jedrska tehnologija prispeva k zadovoljevanju energetske potrebe Evrope v prihodnosti in pomaga izboljšati hude ekološke vplive drugih energetskega virov, je bistveno,

da jo sprejme tudi družba. Sicer utegne javno mnenje ovirati ali celo ustaviti napredek.

Noben posamezen vir energije ne bo mogel zadoščati potrebam prihodnjih generacij. Jedrska energija, ki je zelo napredovala v tehnologiji in varnosti, naj postane eden glavnih prihodnjih virov energije.

Potrebne so dolgoročne raziskave, razvoj in nazoren prikaz programov kot tudi osnovne raziskave cepitve, zlivanja in transmutacije.

Splošno javnost je potrebno racionalno informirati o relativnih tveganjih raznih virov energije. Sodelujoči v procesu odločanja morajo biti dobro poučeni o energetskih vprašanjih, kar je pomembna naloga evropske znanosti.

## Reference (Internetni naslovi ustrezajo stanju 1. novembra 2007)

- [1] *World Commission on Environment and Development, Our Common Future* (New York: Oxford University Press, 1987)
- [2] Statistical Office of the European Communities <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>  
Glej tudi: Europe in figures, eurostat yearbook 2006-07, IS-BN92-79-02489-2,  
Elektronska verzija: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY\\_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/EN/KS-CD-06-001-ENERGY-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/EN/KS-CD-06-001-ENERGY-EN.PDF)
- [3] Helmut Geipel, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Germany, at Greenpeace Workshop on "Klimaschutz durch CO2-Speicherung Möglichkeiten und Risiken", [www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user\\_upload/themen/energie/Geipel\\_BMWA\\_CCS\\_50926.pdf](http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Geipel_BMWA_CCS_50926.pdf)
- [4] Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission, [www.externe.info](http://www.externe.info)
- [5] Uranium Information Centre Ltd., GPO Box 1649N, Melbourne, Australia, [www.uic.com.au/nip100.htm](http://www.uic.com.au/nip100.htm)
- [6] Öko-Institut e.V. (Institute for Applied Ecology) Postfach 50 02 40, 79028 Freiburg, Germany, [www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm](http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm)
- [7] World Information Service on Energy (WISE), P.O. Box 59636, 1040 LC Amsterdam, The Netherlands [www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf](http://www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf)
- [8] Glej tudi: Parliamentary Office of Science and Technology (October 2006, No. 268): Carbon Footprint of Electricity Generation, [www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf](http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf)
- [9] [http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm?wbc\\_purpose=Ba](http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm?wbc_purpose=Ba)
- [10] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, Working group I, [www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf](http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf)
- [11] Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., Frohschammerstr.14,80807 München, [www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm](http://www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm),
- [12] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, WG III, [www.ipcc.ch/SPM040507.pdf](http://www.ipcc.ch/SPM040507.pdf)
- [13] Kyoto-Protocol, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>
- [14] Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future (2003), International Energy Agency (IEA/OECD) Paris, France, [www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050\\_2003.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050_2003.pdf)
- [15] The Role of Nuclear Power in Europe, World Energy Council, 2007, [www.cna.ca/english/Studies/WEC\\_Nuclear\\_Full\\_Report.pdf](http://www.cna.ca/english/Studies/WEC_Nuclear_Full_Report.pdf)
- [16] World Energy Outlook, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, [www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf](http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf)
- [17] Institute of Physics Report: The Role of Physics in Renewable Energy, RD&D, 2005
- [18] [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007\\_0002en01.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007_0002en01.pdf)
- [19] World Nuclear Association, 22a St James's Square, London SW1Y 4JH, United Kingdom, [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)
- [20] Paul Scherrer Institut (PSI), 5332 Villigen, Schweiz, Technology Assessment/ GaBE, <http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>

- [21] World Health Organisation, Avenue Appia 20, CH-1211 Geneva 27, Switzerland, [www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html)
- [22] Bernard L. Cohen: Before it's too late; Springer 1983, ISBN 13-978-0306414251, and [www.ecolo.org/documents/documents\\_in\\_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm](http://www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm)
- [23] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA, [www.mii.org/Minerals/photothorium.html](http://www.mii.org/Minerals/photothorium.html)
- [24] Deutsche Zentrale für Biologische Information, [www.biologie.de/biowiki/Uran](http://www.biologie.de/biowiki/Uran)
- [25] Martin Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz, Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-45-3, new edition, [www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut\\_zu\\_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivtaet\\_strahlenschutz2005.pdf](http://www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivtaet_strahlenschutz2005.pdf)
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Alexanderstraße 3, 10178 Berlin, Germany, [www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang\\_a.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang_a.pdf)
- [27] Niedersächsisches Umweltministerium; Archivstraße 2, 30169 Hannover, Germany, [www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382\\_N23066970\\_L20\\_D0\\_I598.html](http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382_N23066970_L20_D0_I598.html)
- [28] Zur Geochemie und Lagerstättenkunde des Urans, , Gebrüder Borntraeger, Berlin Nikolassee, 1962, ISBN 3-443-12001-6
- [29] Strahlenschutzkommission, Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn, Germany, [www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf](http://www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf)
- [30] Deutsches Krebsforschungszentrum, Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Germany, [http://web.archive.org/web/20050430173258/http://www.dkfz.de/epi/Home\\_d/Programm/AG/Praevent/Krebshom/texte/englisch/204.htm](http://web.archive.org/web/20050430173258/http://www.dkfz.de/epi/Home_d/Programm/AG/Praevent/Krebshom/texte/englisch/204.htm)
- [31] R.Neth: Radioaktivität und Leukämie, Deutsches Ärzteblatt 95, Ausgabe 27, 03.07.1998, S.A-1740/B-1494/C-1386 , [www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227](http://www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227)
- [32] [www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3\\_en.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3_en.pdf)
- [33] [www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm](http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm)
- [34] A.Geist et al.: Reduzierung der Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe durch Abtrennung und Transmutation von Actiniden: Partitioning, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 36(2004), p. 97-102, <http://bibliothek.fzk.de/zb/veroeff/58263.pdf>
- [35] Posiva Oy, 27160 Olkiluota, Finland, [www.posiva.fi](http://www.posiva.fi)
- [36] The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability; A Position Paper of International Experts, IAEA 2003, [www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf)
- [37] Gerald E. Marsh and George S. Stanford: Bombs, Reprocessing, and Reactor Grade Plutonium; Forum on Physics and Society of the American Physical Society, April 2006, Vol. 35, No. 2 <http://units.aps.org/units/fps/newsletters/2006/april/article2.cfm>
- [38] Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences (U.S.), Panel on Reactor-Related Options, 1995, [www.ccnr.org/reactor\\_plute.html](http://www.ccnr.org/reactor_plute.html)
- [39] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation, 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA, [www.nuclearfiles.org/menu/keyissues/nuclear-weapons/issues/terrorism/introduction.htm](http://www.nuclearfiles.org/menu/keyissues/nuclear-weapons/issues/terrorism/introduction.htm)
- [40] J. Carson Mark, Science & Global Security, 1993, Vol. 4, pp 111-128, [www.fissilematerials.org/ipfm/site\\_down/sgs04mark.pdf](http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/sgs04mark.pdf)
- [41] Making the Nation Safer - The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. In: The National Academy Press (Washington DC, USA) 2002; [http://books.nap.edu/catalog.php?record\\_id=10415](http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10415)
- [42] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation, 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA, [www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclearweapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm](http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclearweapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm)
- [43] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, issued by the U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002, [www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm](http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm)
- [44] Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency ("Red Book", 21st edition), [www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf](http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf)
- [45] International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5, A-1400 Vienna, Austria, [www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html](http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html)
- [46] The 2005 IAEA-NEA "Red Book", quoted in [www.world-nuclear.org/info/inf62.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html)
- [47] Frank N. von Hippel: Plutonium and Reprocessing of Spent Nuclear Fuel; Science, 293 (2001) 2397-2398, [www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Sciencev293n5539.pdf](http://www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Sciencev293n5539.pdf)
- [48] Martin Volkmer, Kernenergie Basiswissen , Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-44-5, new edition, <http://lbs.hh.schule.de/klima/energie/kernenergie/basiswissen2004.pdf>
- [49] AREVA Head Office, 27 – 29 rue Le Peltier, 75433 Paris Cedex, France, [www.avevaresources.com/nuclear\\_energy/datagb/cycle/indexREP.htm](http://www.avevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/indexREP.htm)
- [50] Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme, Government of India, Department of Energy, [www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf](http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf)
- [51] [http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&cid=a04210s122t8/lecture\\_notes](http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&cid=a04210s122t8/lecture_notes)
- [52] <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>
- [53] S. David et al. in *Europhysics News* 2007, Vol. 38, no. 2, p. 24
- [54] OECD Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain 12, Boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France, [www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html](http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html)
- [55] [www.iter.org](http://www.iter.org)
- [56] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA, [www.mii.org/Minerals/photolith.html](http://www.mii.org/Minerals/photolith.html)
- [57] SCADPlus: Green Paper: A European strategy for sustainable, competitive and secure energy, <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l27062.htm>
- [58] [http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green\\_paper\\_energy\\_supply\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_en.pdf)
- [59] <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/doc/brusselsdemay2002.pdf>