

Vladimir Knapp, Dubravko Pevec

Nuklearna energija fisije za zaustavljanje globalnog zatopljenja

Sažetak: Nuklearna fisija, kao izvor energije bez emisije CO₂, pokazuje se iznimnim kandidatom za sprečavanje globalnog zatopljenja. S oko 450 reaktora u pogonu ona je provjeren izvor koji je dosegno visoke standarde sigurnosti. Spreman je za izgradnju velikog opsega koji može pokriti barem trećinu budućih potreba za električnom energijom. Naš rad iz 2010. godine pokazao je da su rezerve uranija dovoljne da pokriju pogon od oko trećine budućih potreba s provjerenim lakovodnim reaktorima bez prerade istrošenog goriva. Ta procjena dodatno je potvrđena geološkim podacima u radu iz 2013. godine. Na osnovi tih rezultata članak objavljen 2017. analizira važno pitanje mogućnosti zamjene svih elektrana na ugljen fisijskim elektranama. Za zamjenu bi bilo nužno do 1600 GW standardnih nuklearnih elektrana. Članak iz 2016. razmatra mogućnosti koje se nude nastavkom razvoja torijevih reaktora, posebno u Kini. Na vidiku su stoljeća jeftine i sigurne energije korištenjem torija. Zadnji članak iz 2018. na temelju porasta globalne temperature upozorava da se ne može čekati na razvoj fuzije da bi zaustavili porast temperature iznad 2 °C. Način da se na vrijeme zaustavi pregrijavanje Zemlje je nuklearna fisija uz razvoj obnovljivih izvora i štednju energije. Ni nuklearna fuzija ni izdvajanje i spremanje ugljikova dioksida (CCS) ne mogu doći na vrijeme.

Ključne riječi: klimatske promjene, nuklearna fisija, zamjena elektrana na ugljen, torijeva energija, CCS

Uvod

Radovi koji se prikazuju nastali su od 2010. do uključivo 2018. godine i doprinos su hrvatske znanosti rješavanju jednog od najvećih svjetskih problema. Doprinos je od iznimno važan jer daje kvantitativnu analizu o mogućem efektivnom udjelu fisijske energije u sprečavanju učinaka globalnog zatopljenja.

Globalno zatopljenje prisutno je u svjetskoj javnosti i kod nas kao najozbiljnija opasnost civilizaciji kakva danas egzistira. Hrvatski su znanstvenici vrlo rano (V. Knapp: *Novi izvori energije*, Školska knjiga, 1993.) upozoravali na taj problem, kad to nije izazivalo veću pažnju naše znanosti ni javnosti. Tek se nedavno pažnja okreće prema fisijskoj energiji u tom kontekstu.

Hrvatski doprinos rješavanju tog problema je u tome što kvantitativno analizira i pokazuje da je rješenje moguće korištenjem nuklearne fisijske energije korištenjem predvidivih rezervi uranija s provjerenim nuklearnim reaktorima bez prerade istrošenog goriva. Time se fisijska energija afirmira kao realna mogućnost za sprečavanje globalnog zatopljenja. Predlaže se tehnologija koja je razvijana i unapređivana kroz više od pet desetljeća. U pogonu je više od 450 nuklearnih elektrana. Suvremene nuklearne elektrane dostižu najviše standarde sigurnosti. Napredak u sigurnosti može se ilustrirati s vjerojatnosti taljenja jezgre nuklearnog reaktora koja se smanjila tijekom više od četiri desetljeća za tri reda vrijednosti, što nije poznato široj javnosti.

Hitnost intervencije za smanjenje emisije, u pet do najviše deset godina, reducira mogući izbor alternativnih izvora energije koji bi mogli zamijeniti fosilna goriva. S obzirom na to da se u navedenim intervalima ne očekuje doprinos fuzijske energije (Statement on ITER¹ Progress, od Bernarda Bigota, generalnog direktora organizacije ITER, studeni 2018.) ostaju za taj kritični interval samo obnovljivi izvori i nuklearna fisija. Bigot predviđa da bi se ITER mogao dovršiti do 2035. godine uz pretpostavku isporuke svih komponenata. ITER treba pokazati odvijanje fuzijske reakcije. Nakon 2035. tek slijedi gradnja uređaja DEMO, koji bi imao sve komponente potrebne za konverziju fuzijske energije u toplinsku i dalje u električnu. Gradnja i pogon uređaja DEMO ne mogu se ostvariti prije 2045. godine. Kompleksnost fuzijskog uređaja s magnetskim ograničenjem plazme na principu tokamaka i njegove fizikalno velike dimenzije opravdavaju sumnje u uspješan razvoj ITER-a. Proizvodnja fuzijske energije u uređaju DEMO ne može se očekivati prije 2050. godine, što bi bilo prekasno za uspješno zaustavljanje globalnog zatopljenja.

Da će fuzija, uz pretpostavku da bude uspješna, doći prekasno, slijedi iz analize ugledne skupine njemačkih i engleskih klimatologa iz 2009. godine

¹ITER (engl. International Thermonuclear Experimental Reactor), međunarodni istraživački i inženjerski projekt na polju nuklearne fuzije, koji trenutno gradi najveći svjetski i najnapredniji eksperimentalni 'tokamak', nuklearni fuzijski reaktor u mjestu Cadaracheu na jugu Francuske.

(Meinshausen et al, Greenhouse gas emission targets for limiting global warming to 2 °C, *Nature*, 2009.). Njihove detaljne analize određuju granice emisije CO₂ koje ne smijemo prijeći ukoliko želimo da srednja globalna temperatura ne poraste više od 2 °C. Ti su istraživači odredili “emisijski budžet” kojim raspolazemo nakon 2000. godine uz ograničenje na porast temperature na 2 °C. Taj budžet ograničuje emisiju na 1000 Gt CO₂ nakon 2000. godine, uz statističke granice prekoračenja za 25 %. Od tog budžeta potrošeno je do 2006. godine 234 Gt. Ako bi se nastavila emisija stakleničkih plinova nastala uporabom fosilnih goriva, šumarstva i poljoprivrede na razini od 36,3 Gt/god, taj bi se budžet potrošio do 2027. godine. To znači da bi se 2027. morala bitno smanjiti emisija CO₂. To su, u najkraćim crtama, predviđanja renomiranih klimatologa.

Ne možemo tražiti spas u fatamorgani fuzije. Potrebno je reducirati emisiju CO₂ odmah i sad, što nije retorička figura. Dok su prijetnje porastom globalne temperature kratkoročne, srednjoročno, a riječ je o desetljećima, postoji opasnost od otapanja antarktičkog ledenjaka Thwaites s potencijalom dizanja razine mora od oko tri metra (11 stopa). Riječ bi bila o kataklizmičkim promjenama (Richard Alley, *Scientific American*, Feb. 2019.), za koje se nadamo da će biti izbjegnute zahvaljujući pravodobnim mjerama.

Nasuprot problematičnoj perspektivi nuklearne fuzije, naše su analize najprije pokazale da nuklearna fisijska energija posjeduje (rad iz 2010.), što je bilo osporavano, kapacitet značajnog doprinosa smanjenju emisije CO₂ kao glavnog čimbenika globalnog zatopljenja. Važno je istaknuti da kod nuklearne fisije nije potreban značajniji tehnički razvoj. Nuklearna fisija razvijen je izvor energije koji može iskoristiti pouzdane i sigurne reaktore generacije 3+ za brzo uključivanje u programe gradnje reaktora usmjerene na usporenje globalnog zatopljenja. Za to nije potreban novi tehnološki razvoj, međutim, ono što je potrebno jest razviti serijsku izgradnju odabranih reaktora i specijalizirati proizvodnju komponenata. To može u znatnoj mjeri smanjiti troškove gradnje nuklearnih reaktora. Bilo bi, nakon što prihvatimo oštra ograničenja u rokovima za učinkovitu intervenciju, kontraproduktivno ulaženje u nove razvoje koji odgađaju smanjenje emisije CO₂.

Kratki prikaz radova

Radovi iz 2010. i 2013. godine

Radovi na toj problematici čine logičan slijed počevši s radom iz 2010. koji ispituje dostatnost svjetskih projiciranih rezervi uranija za pokriće značajnog dijela potreba koje proizlaze iz strategije budućeg razvoja svjetske energetike, uz ograničenje porasta srednje globalne temperature na 2 °C. To je početni

korak u toj skupini radova, koji je trebao odgovoriti na pitanje jesu li količine uranija dovoljne za intervenciju u problemu globalnog zatopljenja. To je bilo presudno pitanje o kojem je ovisio smisao daljnjeg rada pa je to odlučilo da se prikaže logična cjelina te skupine radova uključivši spomenuti iz 2010. godine.

U tom je radu najprije trebalo procijeniti buduće projekcije rezervi uranija do 2065. godine. Projicirali smo proces uvođenja nuklearnih elektrana u razdoblju 2025. – 2065. godine zbog pripreme velike serijske gradnje, pa smo trebali procijeniti nalaženje i dobivanje uranija kroz to buduće razdoblje. Polazeći od utvrđenih i mogućih količina uranija iz 2008. godine, (publikacija OECD-NEA-IAEA²), pretpostavili smo da će procijenjene, pa nedovoljno utvrđene, moguće količine biti privedene korištenju do 2065. godine. Neistraženost velikih površina planeta daje potporu ovom zaključivanju. Procjena rezervi uranija svih kategorija bila je na 16 milijuna tona u 2008. godini. Kasnija procjena na osnovi geoloških argumenata u drugom radu skupine iz 2013. godine (D. Pevec i drugi), iznosila je znatno više, čak do 50 milijuna tona. No, rezerve uranija u morskoj vodi su praktički neiscrpne, kojih četiri milijarde tona, ali su cijene takvog uranija zasad previsoke tako da dolaze u obzir samo za specijalne tipove reaktora koji nisu prošli provjeru široke izgradnje i dugotrajnog pogona. To su tzv. oplodni reaktori, o čijoj sigurnosti stručnjaci imaju podijeljeno mišljenje. Prema tome, ti su reaktori isključeni iz razmatranja zahtjevom da se koristi provjerena tehnologija za izgradnju nuklearnih elektrana koja se može primijeniti na velikoj skali potrebnoj za klimatske intervencije u roku od 10 do 30 godina.

Zahtjevu da se radi s provjerenim tehnologijama udovoljavaju vodom hlađeni reaktori s malo obogaćenim uranijem, posebno PWR³ tipa. Takvi su reaktori u pogonu 40, pa i više godina. Neki suptilniji kvarovi vezani uz radijacijsko i kemijsko oštećenje materijala trebaju desetljeća da se razviju. Zato reaktorska sigurnost traži odgovarajuće dugoročno praćenje i istraživanje. Tom zahtjevu udovoljava samo mali broj tehnologija imamo li u vidu gradnju velikog broja reaktora potrebnih za djelovanje na globalno zatopljenje. Rokovi u kojima treba uključiti nove reaktorske tehnologije kraći su nego što se misli (v. Uvod), pa to ograničuje njihovo uvođenje. Za brz učinak na emisiju CO₂, tehnologije koje trebaju više od 30 godina do uvođenja na velikoj skali, neće doći na vrijeme. Taj uvjet isključuje nuklearnu fuziju.

²OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (hrv. Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj); NEA, National Environment Agency (hrv. Nacionalna agencija za okoliš); IAEA, International Atomic Energy Agency (hrv. Međunarodna agencija za atomsku energiju)

³PWR (engl. *pressurized water reactor*), tlačni reaktor, tlakovodni reaktor ili reaktor s vodom pod tlakom

Još su slabiji izgledi za tzv. metodu izdvajanja i spremanja ugljikova dioksida (engl. *carbon capture and storage* – CCS), koja bi trebala ukloniti CO₂ iz ispušnih plinova termoelektrana s obzirom na to da nema izgleda primjene u golemim količinama plina koje bi trebalo sigurno spremati (riječ je o količinama CO₂ koje se mjere u desecima gigatona, dok i veliki današnji projekti obrađuju količine koje se mjere u megatonama, vidi raspravu u radu iz 2018.). Detaljnije razmatranje ostavlja samo obnovljive izvore i nuklearnu fisijsku energiju, koji su raspoloživi u smislu da ne trebaju daljnja opsežnija razvojna istraživanja. Dakako, potrebna je proizvodna mobilizacija, no ona nije bez presedana. Tijekom 80-ih gradilo se tempom do 40 GW godišnje. Kina (Energy Research Institute, 2018.) predlaže izgradnju 433 GW novih nuklearnih elektrana do 2050. godine. Plan svjetske nuklearne industrije Harmony predviđa izgradnju 1000 GW do 2050. godine i pokriće 25 % svjetskih potreba za električnom energijom.

U našim se radovima odabir provjerenih reaktora svodi na dominantne lakovodne PWR reaktore, a lakovodni BWR⁴ reaktori nisu u prvom planu. Moderni PWR reaktori treća su generacija 3, odnosno 3+. U našim razmatranjima odabrali smo generaciju 3+. Kao potpisnica Ugovora o neširenju nuklearnog oružja, kao nenuklearna zemlja nismo razmišljali o preradi goriva, tako da smo u svim analizama pretpostavljali da radimo s jednokratnim korištenjem goriva, bez prerade. Time je određena potrošnja goriva po nuklearnoj elektrani. Na temelju izbora nuklearne tehnologije gorivnog ciklusa mogli smo izračunati reaktorsku snagu kojom bismo s definiranim gorivnim ciklusom potrošili raspoloživu količinu uranija od 16 milijuna tona kroz radni vijek od 40 godina. Dobiven je ohrabrujući rezultat: s pretpostavljenom količinom uranija od 16 milijuna tona može se pokriti bitan dio proizvodnje električne energije u razdoblju od 2025. do 2065. godine, uz linearni porast snage od nule do konačne snage od 3330 GW. Konačna redukcija emisije CO₂ nakon 40 godina, tijekom 2065., iznosila bi 39,6 % od redukcije potrebne da se porast globalne temperature ograniči na 2 °C. Taj rezultat dao je gornju granicu u procjeni, što je moguće postići korištenjem fisijske energije pod danim uvjetima i bio je podloga za daljnja istraživanja uloge koju bi fisijska energija mogla odigrati u suzbijanju globalnog zatopljenja.

Rad u 2016. godini

Sljedeći radovi u tom smjeru bili su, kao publikacije u časopisima, objavljeni 2016., 2017. i 2018. godine. Rad iz 2016. izložio je dugoročnu perspektivu nuklearne energije, baziranu na prelasku, nakon razdoblja rada s lakovodnim

⁴BWR (engl. *boiling water reactor*), reaktor s kipućom vodom

reaktorima na torijeve reaktore s tekućim gorivom. Reaktori s tekućim torijevim gorivom inicirani od pionira nuklearne energetike (A. Weinberg, 1965.), napušteni su nakon uspješnog razvoja od 1965. do 1969. radi hladnoratovskog interesa u plutoniju, koji se ne proizvodi u torijevim reaktorima. Plutonij se proizvodi u uranijevim reaktorima.

U radu se predlaže i kvantitativno analizira simbioza PWR reaktora i torijeva reaktora s tekućim gorivom koji ima dobre pogonske karakteristike, ali kako prirodni torij nije fisibilan materijal, u njemu se ne može pokrenuti lančana reakcija. No, u uranijevu se reaktoru proizvodi plutonij. Kvantitativna analiza u radu iz 2016. pokazuje da se s proizvedenim plutonijem može pokrenuti transformacija torij-232 u uranij-233 i nakon toga održavati izgaranje smjese torij-232 i uranij-233, koji je fisibilan nuklid, a nastaje apsorpcijom plutonijevih neutrona iz nefisibilnog torij-232. Prerada goriva i odvajanje plutonija iz istrošenog goriva lakovodnih reaktora predviđa se nakon što se steknu međunarodni uvjeti za sigurnu preradu istrošenog goriva i to u priznatim nuklearnim zemljama sukladno Ugovoru o neširenju nuklearnog oružja. Tom simbiozom proizvodnje i trošenja plutonija rješava se ujedno problem njegova postojanja i spremanja u istrošenom reaktorskom gorivu, a istodobno omogućuje pokretanje sigurnonosno i ekonomski prihvatljivih torijevih reaktora.

Za slučaj da se nuklearna fuzija pokaže fizikalno neostvarivom ili pak neekonomskim rješenjem, torijevi reaktori s tekućim gorivom nude dugoročnu i sigurnu nuklearnu perspektivu. S obzirom na složen fuzijski uređaj koji se ostvaruje projektom ITER, nije vjerojatno da fuzija s tokamak uređajem može biti ekonomski konkurentna.

Simbioza dominantnih PWR lakovodnih reaktora, koji bi u početnoj fazi proizveli plutonij do prelaska na fisibilni U-233, te torijevih reaktora, može se pokazati, uz razvijene obnovljive izvore, kao energetika XXII. stoljeća i dalje za mnoga stoljeća s obzirom na velike zalihe torija.

Rad u 2017. godini

Rad iz 2017. je u slijedu rada iz 2010. godine, koji je u početnoj fazi odredio gornju granicu učinka na globalno zatopljenje uz pretpostavku korištenja uranija u PWR reaktorima generacije 3+ u otvorenom gorivnom ciklusu, bez prerade goriva. Uz jednake uvjete rada gorivnog ciklusa određena je potrebna količina uranija kako bi se zamijenile sve termoelektre na ugljen nuklearnim elektranama specifikiranim u radu iz 2010., tj. PWR elektranama u otvorenom gorivnom ciklusu. Rezultat proračuna bio je da se s 1600 GW nuklearnih elektranu mogu zamijeniti sve elektrane na ugljen koje bi stupile u pogon 2025. ili prije. Elektrane na ugljen koje bi zadnje ušle u pogon radile bi do kraja radnog

vijeka 2065., ako ne bi prije prestale raditi iz ekoloških, ekonomskih ili tehničkih razloga.

Potrebna zamjenska snaga od 1600 GW gornja je granica, koja ne uračunava eventualnu zamjenu termoelektranama opremljenim CCS instalacijama za odstranjivanje CO₂ iz izgaranja ugljena. Argumenti za isključenje CCS-a detaljnije su izneseni u radu iz 2018. godine. Može se očekivati da će rastuća svijest o štetnosti emisije dovesti do ranijeg izlaska iz pogona dijela elektrana pa je moguće da će se potrebna konačna zamjenska snaga približiti procjeni nuklearne industrije koja predviđa potrebnu snagu od novih 1000 GW (program Harmony). U radu su napravljene i procjene učinka budućih poreza na emisiju CO₂ koje mogu imati značajan utjecaj na ubrzanje procesa zamjene termoelektrana na ugljen nuklearnim elektranama.

Rad u 2018. godini

Zadnji rad iz 2018. polazi od novih podataka o globalnom zatopljenju, a posebice se osvrće na tzv. *hiatus*⁵ i aktualizira rezultate grupe Meinshausen iz 2009. godine (Nature 2009.). Na temelju tih rezultata upozorava se da je vrijeme za ozbiljnu intervenciju kraće no što se misli, ne više od četiri do osam godina. Prema analizi u njihovu radu, svijet može emitirati 1000 Gt CO₂ nakon 2000. godine. Do 2006. od tog budžeta potrošeno je 234 Gt. Ako je godišnja emisija CO₂ od izgaranja fosilnih goriva, šumarstva i poljoprivrede 36,3 Gt, onda ćemo budžet potrošiti do 2027. godine ako želimo da globalno zatopljenje ne prijeđe 2 °C. Na raspolaganju imamo manje od deset godina za drastične redukcije emisije. Stoga imamo eksplicitan stav o fuziji i CCS-u. Ni fuzija, a pogotovo CCS ne stižu na vrijeme.

S obzirom na to da imamo obrazložen zaključak da jedino fisijska energija, obnovljivi izvori i štednja energije dolaze u obzir za pravodobno sprečavanje globalnog zatopljenja, razmatra se način sudjelovanja u pokrivanju potrošnje električne energije bez emisije CO₂. Kako dosad nije razvijen način spremanja velikih količina energije, predlaže se učešće nuklearne energije pokrivanjem bazne potrošnje, dok bi energija vjetra i Sunca pokrivale potrošnju ovisnu o vremenskim uvjetima. Rad sadrži prijedlog koji je zamišljen za povećanje prihvatljivosti nuklearne fisijske energije. Budući da zamjena svih elektrana na ugljen traži do 1600 GW nuklearnih elektrana, članak sadrži i prijedlog dodatnog osiguranja kvalitete prilikom izgradnje velikog broja nuklearnih elektrana.

Prikazani razvoj nuklearne sigurnosti kroz vjerojatno najvažniji indikator, godišnju vjerojatnost taljenja reaktorske jezgre, koja je kroz četiri desetljeća smanjena za tri reda veličine. No, nužno je osigurati kontrolu i sigurnost i u

⁵engl. *hiatus*, željeni ili neželjeni prekid kontinuiranog rada

svakoj bitnoj komponenti elektrane i provjeriti cjelinu elektrane. Nesreća na reaktoru u Fukushima izbjegla bi se da se poštovala procjena visine cunamija. Nesreća u Fukushima pokazuje kako za sigurnost nuklearne elektrane nije dovoljno da nuklearni dio postrojenja bude siguran. Elektrana kao cjelina mora biti sigurna.

Tablica 1.: Smanjenje godišnjih vjerojatnosti taljenja jezgre, najtežeg kvara na nuklearnoj elektrani

Razdoblje evaluacije	Reaktorska generacija	Godišnja vjerojatnost taljenja reaktorske jezgre
1969. – 1974.	generacija II	10^{-4} do 10^{-3}
1980-te godine	generacija nakon incidenta na elektrani TMI	10^{-4}
1996.	napredna generacija II (Sizewell B)	$2 \cdot 10^{-6}$
2010.	generacija III+ (AP 1000)	$5 \cdot 10^{-7}$

Kako je za zamjenu svih termoelektrana na ugljen nužno izgraditi više od tisuću nuklearnih elektrana, u radu iz godine 2018. predlaže se međunarodno odobravanje projekta od strane IAEA-e, koje bi prethodilo izgradnji ako postoji prekogranični rizik zbog pogona elektrane.

Zahvala

Profesori Vladimir Knapp i Dubravko Pevec imali su vodeću ulogu u koncipiranju i vođenju ovih istraživanja u svakoj fazi rada. Važan doprinos u prvom radu pripada dr. sc. Mariju Matijeviću, koji je tad radio na doktoratu. Dinka Lale i Boris Crnobrnja rade na doktoratima.

Publicirani radovi u okviru istraživanja o potencijalu fisijske energije u sprečavanju globalnog zatopljenja

- Knapp, V., Pevec, D., Matijević, M. (2010): The potential of fission nuclear power in resolving global climate change under the constraints of nuclear fuel resources and once – through fuel cycles, *Energy Policy*, br. 38, str. 6793-6803.
- Pevec, D., Knapp, V., Trontl, K., (2012): Long term sustainability of nuclear fuel resources, u: Revankar, S. T. (ur.), *Advances in Nuclear Fuel. Intech*, Rijeka, str. 1-26.
- Knapp, V., Pevec, D., Matijević, M., Crnobrnja, B., Lale, D. (2016): Long term fuel sustainable fission energy perspective relevant for combating climate change, *Journal of Energy and Power Engineering*, br. 10, str. 651-659.
- Knapp, V., Pevec, D., Matijević, M., Lale, D. (2017): Carbon emission impact for energy strategy in which all non-CCS coal power plants are replaced by nuclear power plants, *Journal of Energy and Power Engineering*, br. 11, str. 1-10.
- Knapp V. i Pevec D. (2018): Promises and limitations of nuclear fission energy in combating climate change, *Energy Policy*, br. 120, str. 94-99.

Nuclear fission energy to stop global warming

Vladimir Knapp and Dubravko Pevec

Abstract: Nuclear fission as an energy source with emission of CO₂ is emerging as outstanding candidate for mitigating the effects of global warming. With about 450 reactors in operation it is well proven energy source reaching excellent safety records. It is ready for large scale deployment to cover about one third of the future electricity needs. Our study from 2010. has shown that uranium resources are adequate to cover this part of future electricity needs with well proven light water reactors without fuel reprocessing. This estimate was further confirmed by geological data in paper published in 2013. Based on these results paper published in 2017. analyses the very important issue of removal of all coal power plants by 2065. To replace coal by nuclear fission power required upper limit would be 1600 GW of conventional nuclear power plants. Paper published in 2016. deals with long term possibilities offered by thorium fuel cycle. It could introduce centuries of cheap and safe energy. Last paper in the line of argues from the data on the rise global temperatures that we cannot wait for nuclear fusion in order to stop the rise above 2 °C. Only way to stop the Earth overheating above 2 °C is nuclear fission in combination with renewable resources and energy saving. Neither nuclear fusion nor carbon capture could be developed in time.

Keywords: climate change, fission energy, replacement of coal power, thorium, fusion energy, CCS