

Fuzijska baklja može stvoriti nove sirovine

Fuzijska baklja može stvoriti nove sirovine minerala iz običnog blata i kamena, riješiti problem otpada reducirajući ga na njegove sastavne dijelove, izvještava Marjorie Mazel Hecht.

Kako brzo će svijet ostati bez potrebnih sirovina, od pitke vode do strateških minerala, ne bi trebalo biti razlog panici, ograničenjima ili pozivanju na smanjenje pučanstva. Imamo sada mogućnosti stvaranja potrebnih resursa koristeći napredne tehnologije. Konvencionalni nuklearni reaktori mogu snabdijevati energiju za desalinizaciju morske vode a visoko temperaturni nuklearni reaktori mogu učinkovito stvarati vodik koji bi zamijenio naftu kao gorivo. Čak i još više temperature raspoložive kod termonuklearne fuzije snabdjet će nas radnom plazmom koja može reducirati smeće i otpad na njihove sastavne elemente i time riješiti problem zbrinjavanja otpada. Te će visoko temperaturne plazme biti u mogućnosti „vaditi“ strateške minerale izravno iz običnog kamena.

Ova nova vrsta fuzijske baklje dramatično će izmijeniti odnos čovjeka naprama zemljinoj kori. Da biste dobili ideju što to znači, pomislite o procjeni da oko 1,5 kubičnog km običnog kamena može dati gotovo 200 puta više količine godišnje proizvodnje aluminija SADA, oko 8 puta željeza, 100 kositra i 6 puta cinka. Iako će još uvijek trebati pronalaziti najbogatije moguće rudače za sadašnje uporabe, ova nova tehnika dopustit će učinkovito iskorištenje siromašnijih rudača. Štoviše, fuzijska baklja u kombinaciji s novim tehnologijama odjeljivanja izotopa omogućit će nam potpunu uporabu svih 3000 izotopa. Doista nema granica rasta ako dopustimo potpuni razvoj znanstvenih ideja i planova koji potječu još iz šezdesetih godina XX. stoljeća kad su znanost i pučanstvo svijeta otjerali s glavne ceste napretka na seoski put niske tehnologije.

Sila plazme

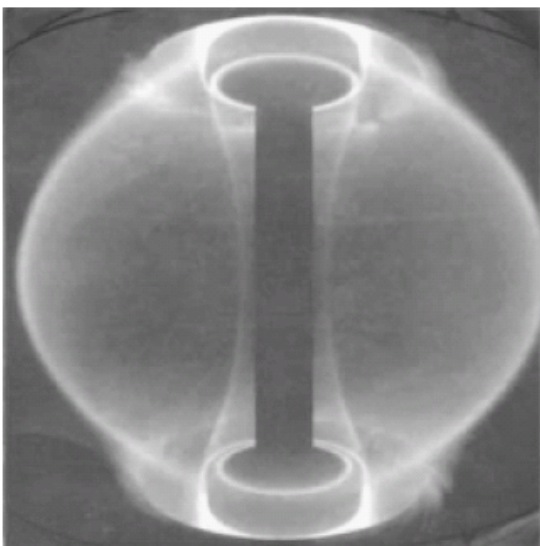
Fuzijske plazme su, vrela, ionizirani plinovi na temperaturama od 50 do 200

milijuna stupnjeva, tako vruće da se svaku tvar može obrađivati na njenoj atomskoj razini. (Ionizacija znači da su elektroni odijeljeni od atoma ostavljajući električni naboj). Pred 40 godina kad je patentirana ideja fuzijske baklje znanstveni je optimizam prevladavao i pretpostavilo se da će razvoj fuzijskih reaktora biti prirodni nastavak nuklearne fisije. Istraživanja se vrše na mnogim napravama i postupcima za dobivanje fuzije (tokamak naprave, stellaratori, 'Elmo Bumpy Torus' [Neravni prsten 'Elmo'], 'z-pinch', samo da navedemo nekoliko), i nastalo je i veliko uzbuđenje zbog mogućih ostvarenja, slično uzbuđenju oko istraživanja sunčevog sustava.

Razvoj fisije i fuzije doživio je prekid početkom sedamdesetih zbog protuznanstvene ideologije (i drastičnog smanjenja novca iz proračuna koji je uslijedio) koja je uvedena u Ameriku da bi ljude odvratili, a naročito mlada pokoljenja, od ideje napretka. Upravo zbog obećavajućih mogućnosti fisije i fuzije da promjene životni standard u čitavom svijetu, i podignu Treći svijet iz bolesti i siromaštva u prosperitet, te su tehnologije izvrngnute napadu i gotovo su pokopane u istim Sjedinjenim Državama koje su ih razvile.

Kako 2006. nuklearna energija počinje svoju renesansu širom svijeta, dolazi vrijeme pokretanja „ponovnog rođenja“ termonuklearne fuzije među pučanstvom. Plitkoumna ogovarala obiju tehnologija, i sitničave pragmatičare voljne čekati još 50 godina, treba grubo i duljevremeno prodrmati, jer ovu zemlju [Ameriku] nisu izgradili ljudi koji su govorili: „To nije moguće“, „Ovo ne može funkcionirati zbog _____ (napišite svoj razlog), „Preskupo je“, ili „Poremetit će majku prirodu“. Cilj ovog članka je uzdrmati one kojima to treba, i dati

početne edukativne pojmove onima koji žele više znati.



Iskrenje plazme u MAST-u, europskoj kuglastoj napravi tokamak fuzije u Culhamu u Engleskoj. U Kuglastom tokamaku plazma izgleda više kao oguljena jabuka nego prsten.

Termonuklearna fuzija

Kod fisije, raspadanje najtežih elemenata (kao što je uranij) oslobađa strahovitu količinu toplinske energije. Kao gorivo uranij ima 3 milijuna puta veću **gustoću energije** od ugljena i 2.2. milijuna puta veću od nafte. No fuzija izotopa vodika je nekoliko redova veličine gušća kao i zahtjevnija u ovladavanju kao kontrolirani izvor energije. (vidi **Tablicu 1**).

Kad se dva atoma najlakšeg elementa, vodika stope ('fuzioniraju') taj postupak proizvede helij (drugi najlakši element) i „slobodnu“ energiju u vidu topline. Za svake dvije jezgre vodika kao goriva nastaje jedna jezgra helija (zvana i alfa čestica) kao i određena količina energije, koja nastaje iz razlike u masi između ulaznog vodika i proizvedenog helija. (Vidi **Prikaz 1**).

Fuzija je proces koji se odvija u Suncu i zvjezdama, kad se lakši elementi sudaraju pri velikim brzinama i velikim gustoćama. Problem je kako reproducirati taj proces na Zemlji. Da bi se stopili atomi u laboratoriju potrebne su vrlo visoke temperature poput Sunca—desetke milijuna stupnjeva C—i način obuhvaćanja i obuzdavanja reakcije, održavajući njenu istomjernu stopu kroz duže vremena.

TABLICA 1

Gustoća energije raznih izvora (MW/km²)

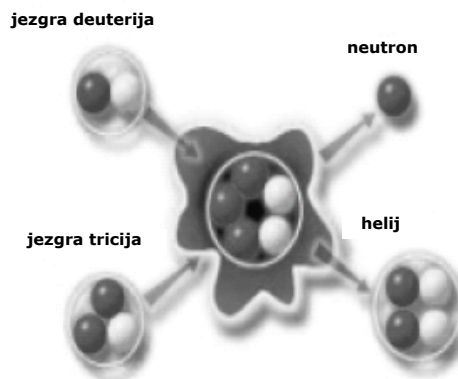
| | |
|------------------------------|--------------|
| Sunčeva—biomasa | .0000001 |
| Sunčeva—Zemljina površina | .0002 |
| Sunčeva—u putanji oko Zemlje | .001 |
| Fosilna (ugljen, nafta) | 10.0 |
| Fisija | 50.0 – 200.0 |
| Fuzija | bilijuni |

Visokokoncentrirana priroda nuklearne i fosilne energije je zapanjujuća u usporedbi s raspršenom prirodom sunčeve energije na zemljinoj površini. Čak i kad se postave kolektori u putanju oko Zemlje, gustoća energije je još uvijek 4 do 5 redova veličine niža od fosilnih goriva.

I kod Sunca i u laboratoriju ultra visoke temperature ogole jezgru od negativno nabijenih elektrona i time nastaje plin visokog naboja, zvan plazma. Plazma, zvana i četvrto stanje materije, sad je već uobičajenija riječ zbog tehnologije TV zaslona. Zasloni na plazmu imaju dva tanka sloja stakla s plinovima argonom, neonom i ksenonom zatvorenim između. Atomi plina se električnim impulsima uzbude u stanje plazme emitirajući boju.

Prikaz 1

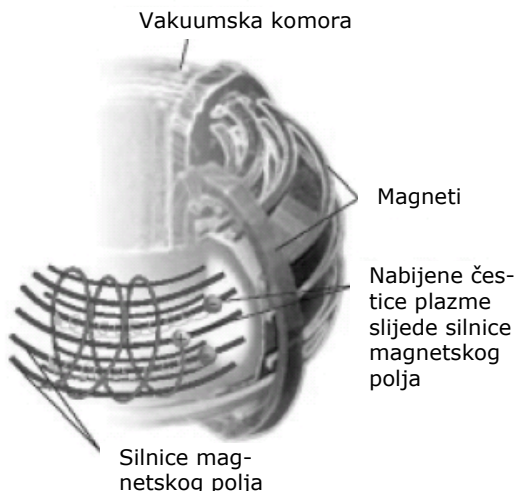
Proces fuzije



Izvor : "The Surprising Benefits of Creating a Star," U.S. Department of Energy, 2001.

Fuzijska reakcija nastaje kad se dva izotopa vodika, deuterij i tricij, spoje i stvore veći atom oslobađajući u tom procesu energiju. Fuzija je gorivo Sunca i zvijezda, no u laboratoriju atome se mora zagrijati na barem 100 milijuna stupnjeva pod dostatnim pritiskom da bi došlo do fuzije. Drugi laki elementi se mogu također stopiti.

Prikaz 2
Fuzija s magnetskim ograničenjem



Izvor: "The Surprising Benefits of Creating a Star," U.S. Department of Energy, 2001.

Ovaj grafikon fuzijskog tokamaka pokazuje magnete, silnice magnetskog polja i nabijene čestice plazme koje slijede silnice vrteći se u spirali oko tokamaka. Magnetsko polje 'ograničava' plazmu.

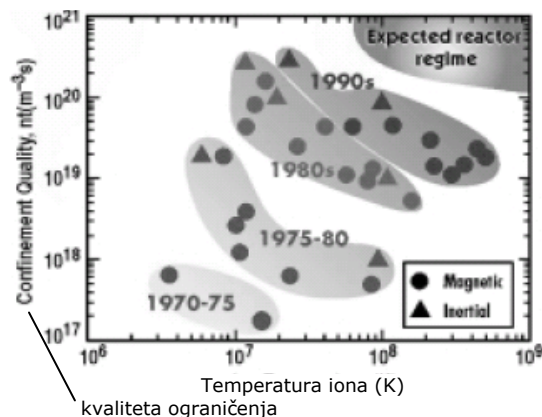
Nakon razdoblja pedesetih znanstvenici su istraživali različite načine zagrijavanja i obuzdavanja vodikovih jezgri u svrhu stapanja atoma izotopa teškog vodika (deuterija, H-2, i tricija, H-3). Kao što im ime govori deuterij ima dva neutrona a tricij tri, dok obični vodik ima samo jedan. Deuterij se nalazi prirodno u morskoj vodi no tricij je rijedak i mora ga se stvarati raspadom litija.

Poznate su dvije osnovne metode kontroliranja fuzije, magnetsko ograničenje i inercijalno ograničenje.

Magnetsko ograničenje. Kod te metode magnetska polja se koriste da 'drže' fuzijsku plazmu na mjestu. Najobičniji uređaj magnetskog reaktora zove se tokamak, po ruskim riječima za prstenastu komoru. Fuzijsku plazmu ograničava na prstenasti prostor jako magnetsko polje koje tvori splet prstenastih i 'poloidalnih' magnetskih polja (prvo se odnosi na dulji hod oko prstena a drugo na kraći). Rezultirajuće magnetsko polje natjera čestice fuzije na spiralni hod oko polja silnica (**Prikaz 2**). To ih sprječava

od udara u zidove posude reaktora, što bi ohladilo plazmu i onemogućilo reakciju.

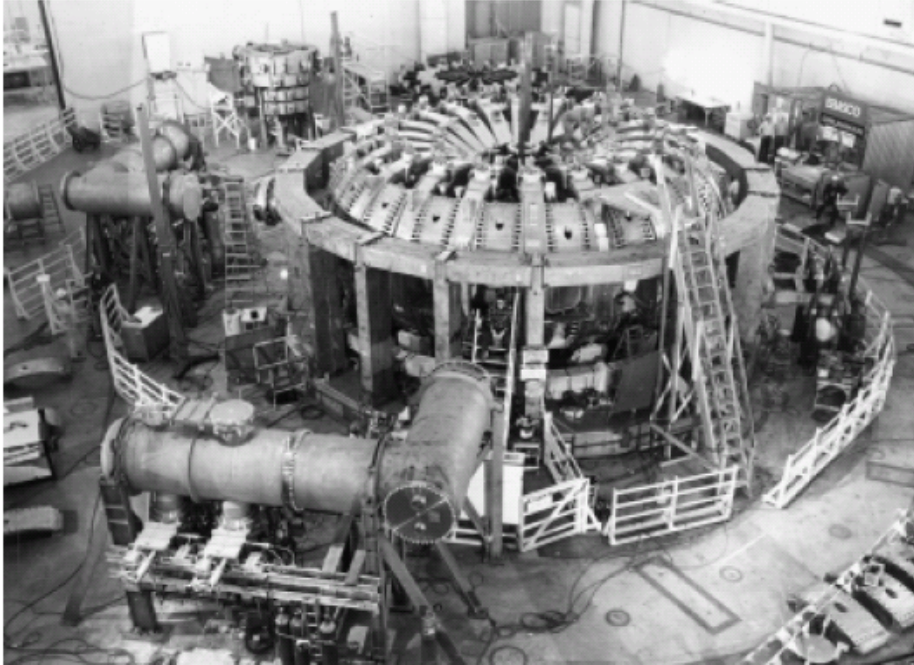
Prikaz 3
Napredak fuzije



Iako je program fuzije prisilno izbačen iz inženjstva u znanstvena istraživanja, magnetska i inercijaska fuzija se postojano razvija, desetljeće po desetljeće, u kvaliteti ograničenja plazme (mjereno u gustoći plazme puta ograničenje) kao funkcije temperature plazme (u stupnjevima K). Uvjeti kvalitete plazme podobne reaktoru su u gornjem desnom uglu ['očekivani režim podoban reaktoru'—u prijevodu].

Baš kao i kod fisije gdje se brzina i gustoća fizijskih atoma, i najpogodniji izotopi moraju pažljivo odabrati i inženjerski obraditi da bi se stvorili optimalni uvjeti za lančanu reakciju tako i kod fuzije istraživači moraju dokučiti najpogodniju gustoću vodika i druge uvjete da bi došlo do fuzije. To postaje zabavno, u konstruiranju različitih naprava za provjeru hipoteza o održanju i kontroli fuzijske plazme.

Postoje mnogi istraživački reaktori vrste tokamak diljem svijeta uključujući i reaktore malih veličina u Sjedinjenim Državama, a nastao je i niz sve većih tokamaka u 'Princeton Plasma Physics' laboratoriju. Razvoj bi se nastavio da nije bilo rezanja proračunskih sredstava. Svaki reaktor u nizu postizao je više temperature i duže vrijeme ograničenja. Svaki slijedeći reaktor je također pokazivao napredak u rješavanju tehničkih poteškoća, kao što su zagrijavanje, turbulencije, i zračenje (**Prikaz 3**).



Princeton Plasma Physics Laboratory

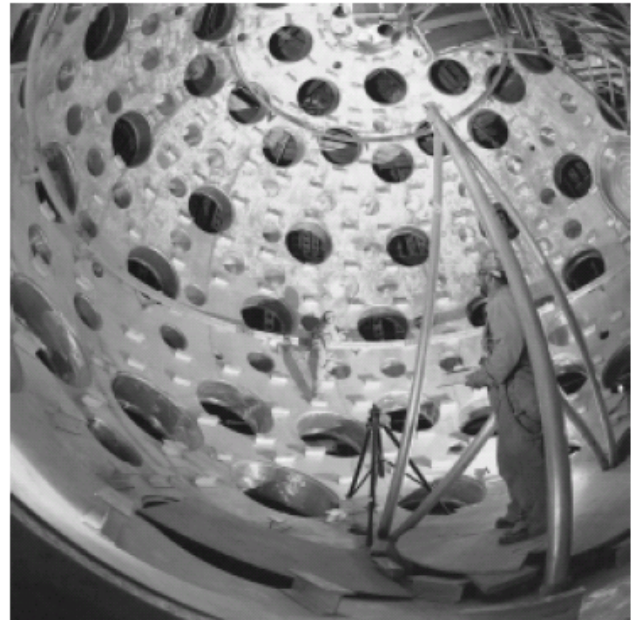
U nedavnom intervjuu, Ben Eastlund je rekao da je predlagao male tokamake kao snabdjevače za svoju fuzijsku baklju. Ovdje, TFTR, tokamak Princetonskog Laboratorija Plazma Fizike u prosincu 1982. Slijedeći istraživački tokamaci koji su se planirali u programu Princetona nisu sagrađeni.

Najveći sadašnji uređaj je tokamak pod međunarodnim pokroviteljstvom, ITER, koji se gradi u Cadarache-u u Francuskoj, čija je svrha proizvodnja energije iznad praga rentabilnosti, to jest proizvesti više energije od one utrošene u ostvarenje fuzije kroz dulje vremensko razdoblje. Pokrovitelji su Europska Zajednica, Japan, Ruska Federacija, Koreja, Kina, Indija i SAD. Cilj ITERa je proizvesti 500 MW fuzijske energije koja će se održati do 500s. ITERov prethodnik, JET ('Joint European Torus [Zajednički europski prsten] proizveo je 16 MW kroz manje od 1 s.

ITER će proizvesti neto energiju kao toplinu no toplina se ne će koristiti za proizvodnju električne energije. Ned R. Sauthoff, voditelj projekta za sudjelovanje SADA u ITERu, procjenjuje da će ITER stupiti u funkciju do 2016., a da će komercijalne nuklearne uslijediti do 2050. Komercijalna nuklearna elektrana bi proizvodila oko 3,000 do 4,000 MW toplinske energije.

Inercijalno ograničenje. Kod inercijalnog ograničenja, poznatog i kao laserska fuzija, laseri ili snopovi elektrona se fokusiraju na malu kuglicu fuzijskog goriva, rasplamsavajući je u sićušnu kontroliranu fuzijsku eksploziju (**Prikaz 4**). Nasuprot tome kod hidrogenske bombe koristi se fisija za rasplamsavanje fuzijskog goriva u *nekontroliranoj* fuzijskoj reakciji. Izraz „inercijalni“ odnosi se na činjenicu da atomi

mete moraju koristiti svoju vlastitu inerciju da se ne razlete prije nego se stope.



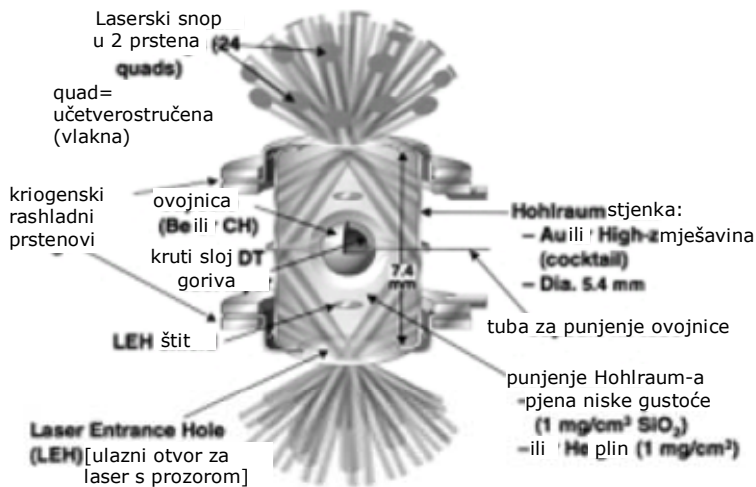
LLNL/Jacqualina McBride and Bryan Quintard

Unutar komore 'National Ignition Facility [Nacionalnog postrojenja za paljenje] Lawrence Livermore National Laboratory-ja. Meta fuzijskog goriva je sićušna no komora je promjera oko 10 m i teži oko 450,000 kg.

Osnovna je zamisao brzo zagrijati površinu mete tako da bude okružena vrućom plazmom. Zatim kako vruća površina „ispali“ materijal kao raketu, gorivo se sabija.

Prikaz 4

Inercijalno ograničenje



Izvor: Lawrence Livermore National Laboratory.

Grafikon Postrojenja nacionalnog paljenja pokazuje raspored laserskih snopova fokusiranih na sićušno zrnce fuzijskog goriva (deuterija i tricija) u ovojnici berilija i karbita. Laserski snopovi sabijaju i zagrijavaju zrnca goriva u milijardnom djeliću sekunde tako da se deuterij i tricij stope prije nego što zrnca odleti. Izraz "inercijsko" odnosi se na činjenicu da atomi moraju imati dovoljno inercije da pruže otpor odljepljenju od površine prije nego se spoje.

Jezgra goriva u meti postaje krajnje gusta pa se zatim zapali kad dosegne 100 milijuna stupnjeva C. Dok „izgara“ proizvede mnogo puta više energije od energije ulaznog snopa.

Sjedinjene Države imaju veliko ovakvo postrojenje u Lawrence Livermore Laboratory-ju, NIF odnosno 'National Ignition Facility' [Nacionalno postrojenje za paljenje]. Drugi programi laserskih inercijalnih ograničenja su OMEGA laser u laboratoriju Sveučilišta u Rochesteru za 'Laser Energetics', 'the Nike' u laboratoriju Naval Research, i Trident u Nacionalnom laboratoriju Los Alamos. Postoji još i Ubrzivač snopa čestica i postrojenje impulsne energije Saturn u Nacionalnom laboratoriju Sandia.

Sve programe inercijalnog ograničenja podržavaju Ministarstvo energije i njegova 'National Nuclear Security Administration' [Administracija nacionalne nuklearne sigurnosti] kao i druge programe nacionalne obrane povezane s nuklearnim naoružanjem i ciljevima civilne energetike i temeljne znanosti. Zbog aspekta naoružanja oni

postaju mete antinuklearnih skupina koje žele ukinuti program naoružanja i sve drugo što ima veze s nuklearnim uključujući i fuzijsku energiju. NIF uživa također i suradnju s industrijom i sveučilištima.

NIF je najveći laser na svijetu veličine nogometnog igrališta i veoma snažan. Laserski sustav jednak je 1000 puta čitave proizvodnje električne energije SADA. Svaki impuls je veoma kratak, tek nekoliko milijardnih djelića sekunde, usmjeren na sićušnu metu veličine 1 mm—veličine jedne kuglice zračnog pištolja. Pokusi se sastoje od usmjeravanja tog snažnog snopa na metu kroz sitni djelić sekunde i proučavanja rezultata nakon toga.

Što je bilo s fuzijom

Zadnjih 25 godina istraživanja fuzije u SADu odaju

tužnu priču: program fuzije postao je žrtva tako oštrog rezanja proračuna da se nije mogao ostvariti nikakav inženjerski napredak samo istraživanja znanstvenih problema. No ipak nakon 1980. istraživanja fuzije su tako dobro napredovala i javilo se mnoštvo fuzijskih naprava, da su oba doma Kongresa izglasala Zakon o inženjerskom radu na dobivanju energije magnetskom fuzijom 1980. koji je dao ovlaštenja u duhu Apollo programa, da Sjedinjene Države ubrzaju tadašnji program magnetske fuzije da bi (1) izrade funkcionalni **inženjerski** uređaj do 1990. godine, te (2) izradile demonstracioni reaktor do kraja stoljeća.

Taj zakon, Javni zakon 96-386 postao je zakon 7 listopada 1980 i potpisao ga je Predsjednik Carter. Svrha zakona je: „Ostvariti ubrzani program istraživanja i razvoja tehnologija energije magnetskom fuzijom što će dovesti do konstrukcije i uspješnog rada demonstracijskog postrojenja magnetske fuzije u SADu prije kraja 20. stoljeća, a radit će pod pokroviteljstvom Ministarstva Energije“.



Magazin „Fusion“ doveo je riječi „energija fuzijom“ u svakodnevnu uporabu i kućni izraz u razdoblju od 1977. – 1984. Na slici kongresnik Mike McCormack, demokrat države Washington drži govor na konferenciji Zaklade za energiju fuzijom u Washingtonu, D.C. u svibnju 1981. Zakon o inženjerskom radu na dobivanju energije magnetskom fuzijom, koji je 1980. postao zakonska odredba zvao se McCormackov zakon u čast svog neumornog šampiona.

Taj zakon je dao specifikaciju načina ostvarenja toga i potrebna financijska sredstva, to jest udvostručenje proračuna iz 1980. za magnetsku fuziju u sljedećih 7 godina, počevši s povećanjem financiranja od 25% u fiskalnoj godini 1982. i 1983.

Lyndon LaRouche-eva Fusion Energy Foundation [Zaklada energije fuzijom] u studenom 1974. bila je u središtu borbi za fuziju i magazin Zaklade *Fusion*, koji je imao cirkulaciju od 200,000 doveo je riječ „fuzija“ u svakodnevnu uporabu godinama prije uspješnog izglasavanja zakona za fuziju. Pružio je javnosti obrazloženje znanosti fuzije i eksperimentalnog napretka raznih vrsta fuzijskih naprava.

No proračunska sredstva u zakonu za fuziju nisu nikad bila raspodijeljena za vrijeme Reaganove vlade. Zakon je ostao u zakonskim zapisima a Ministarstvo energije odredilo je da fuzija bude samo „istraživački program“ a ne inženjerski kao što je bilo određeno zakonskim činom. Kao i Apollo program fuzija je privukla na sebe gnjev onih koji su govorili da će biti preskup—bez ikakvog obzira na veliku dobrobit za buduća pokoljenja od usavršavanja visoko temperaturnog izvora energije čije gorivo se dobiva iz morske vode i koje nema otpada. Ti kritičari—uključujući nakon 1989. mnoge istraživače „hladne fuzije“, čija istraživanja

također nemaju podrške u proračunu—prigovarali su tada da su istraživanja fuzije dobila X svotu novca godinama bez da su proizvela komercijalnu fuziju, pa zašto se gnjaviti s bacanjem novca u „bezdan“.

Sveukupni problem je duboko neznanje funkcioniranja fizičke ekonomije, i koji postotak javnih sredstava se mora, za zdravo gospodarstvo, ulagati u znanstveno istraživanje koje treba biti pokretač ostatku gospodarstva. Bez takvog znanstvenog stroja gospodarstvo kroči u slijepu ulicu. Dok su SAD sve dublje tonule u „usluge“ umjesto proizvodnje, i sjekle i „privatizirale“ istraživačke programe svojih nacionalnih laboratorija, sveučilišta i drugih ustanova, nacija je uglavnom izgubila sposobnost otkrivanja novih znanstvenih zakonitosti i obrazovanja novih pokoljenja studenata, koji bi bili u stanju voditi zemlju naprijed.

Ako se ta politika protiv znanosti i protiv blagostanja ne preokrene, ova će se država srozati na status zemlje Trećeg svijeta uvozeći tehnologije usavršene negdje drugdje. Potreban nam je udarni program da nadoknadimo što smo izgubili i osiguramo primjenu zakona o inženjerskom radu na dobivanju energije magnetskom fuzijom iz 1980. u sljedećih 25 godina.

Znanstvena kratkovidnost u rezanju fuzijskog proračuna povećala se 1999., kad su SAD odlučile da ne će financirati svoj udio u suradnji međunarodnih napora oko fuzije u programu ITER, ostavivši projekt Europi, Rusiji, Japanu i drugim državama. (Tu su odluku preokrenuli 2003. i SAD sad sudjeluju u ITERu.) Danas u fuziji stojimo na šaci američkih istraživačkih reaktora koji se svi vuku puževim korakom po nacionalnim laboratorijima, sveučilištima i jednoj privatnoj tvrtki (General Atomics), s malom jezgrom iskusnih fuzijskih znanstvenika i malim brojem mlađih studenata.

Ostvarenje fuzijskog reaktora za fuzijsko gospodarstvo primjer je velikih projekata, s planiranjem za 50 godina unaprijed kad većina prvotnih sudionika ne će više biti na životu. No koje bi veće nadahnuće mlađim pokoljenjima bilo od rada na usavršenju praktički neograničenog izvora energije—umjesto goriva iz balege.

Povijesni osvrt na fuzijsku baklju

Povijest čovjekovog razvoja na Zemlji može se najpreciznije mjeriti pomoću osnovne koncepcije fizičke ekonomije koju je razvio Lyndon LaRouche, a to je stopa promjene relativne potencijalne gustoće napućenosti. Ili kako ljudsko društvo može podržati sve veći broj ljudi po četvornom kilometru naseljenog područja. Ključ toga je ovladavanje sve zamršenijim tehnologijama koje dopuštaju stanovništvu naptredovati iznad ograničenja prirodnih prilika, klimatskih i geografskih. Da bismo to postigli pojedinci moraju sve više *stvarati* nove resurse i to pogotovo energetske, kao i tehnologije sve gušćih i gušćih [protoka] energije da bi cjelokupno društvo napredovalo. Tim načinom nadvladaju se prijašnje granice rasta društva.

Povećanje gustoće protoka energije raspoloživih tehnologija izravno je u odnosu s rastom pučanstva. U određenom trenutku ljudske povijesti rudače nisu postojale, jer nije bilo izvora energije da pretvore minerale u nešto drugo osim u kamen i prašinu u kojima smo ih pronašli (osim uporabe primitivnih alata za oblikovanje drugih primitivnih no korisnih predmeta). Dolazak vatre i razrada njene uporabe te je prilike promijenila dajući mnogostruko povećanje u gustoći energije za taljenje, pretvaranje cinka i bakra u broncu, na primjer. Tisuće

godina kasnije novi 'kamen', uranij postao je moćni izvor energije.

Svakim napretkom tehnologije—drvo, ugljen, nafta, benzin, uranij—dolazi do dramatičnog povećanja ljudskog stanovništva, zbog uporabe tehnologija sve većih gustoća energije (vidi Prikaz 1). Uistinu smo kamenje, prašinu i druge tvari pretvorili u energetske sirovine. Ispred nas sad leži fuzija, nastala iz goriva morske vode, bilijun puta veće gustoće energije od svojih prethodnika, a nakon toga, tko zna? Interakcija međudjelovanja materije i antimaterije? Ili možda će nešto drugo prisiliti još više „fizičkih zakona“ u dobro zasluženu mirovinu.

Fuzijska baklja nije onda iznenađenje, kad se gleda na nju kao kariku u takvom lancu događaja.

U svibnju 1969., dva znanstvenika iz Odbora za atomsku energiju SADa, Bernard J. Eastlund i William C. Gough, objavili su knjižicu *Fuzijska baklja: zatvaranje ciklusa od uporabe do recikliranja*, koja opisuje dvije uporabe plazmi ultravisokih temperatura koje su očekivali postići s komercijalnim fuzijskim reaktorima. Prva je bila fuzijska baklja koja bi koristila visoku temperaturu plazme „i svela *svaku* tvar na njene osnovne elemente za daljnje odjeljivanje“. Druga je bila „uporaba fuzijske baklje u pretvorbi energije ultravisokih temperatura plazme u polje zračenja što bi dopustilo da se proces zagrijavanja odvija *u tijelu* tekućine“. Na primjer, teški elementi bi se dodali plazmi tako da ona počne emitirati Röntgenske zrake ili drugo zračenje u velikim količinama koje bi djelovale bez ograničenja od površine koja bi absorbirala dio energije.

Njihova zamisao, začeta 1968. godine zarobila je maštu mnogih uključujući i nacionalni tisak, koje je izvjestio o fuzijskoj baklji masnim naslovima kao „Znanost svemirskog doba pretvorila bi zagađujući otpad u atome“ (*Washington Post*, 26. studenog 1969.), i „Utapate se u otpadu? Isparite ga fuzijom!“ (*New York Times*, 15. ožujka 1970.).

U prvoj primjeni, plazma proizvedena u fuzijskom reaktoru koristila bi se za udarno isparavanje (propagaciju udarnih valova) i ionizaciju krutog tijela kao što su smeće ili kamenje. Zatim, tehnike odjeljivanja bi se koristile za „odvajanje ioniziranih tvari prema

njihovom atomskom broju ili atomskoj masi". Eastlund i Gough zapažaju da postoji nekoliko mogućih tehnika odjeljivanja, uključujući i elektromagnetizam, suzbijanje toka plazme, selektivna rekombinacija, ili izmjena naboja.

Kod druge primjene, natruhe bi se odabranih elemenata ubrizgale u plazmu fuzijske baklje što bi dopustilo kontroliranje frekvencije i jačine emitiranog zračenja. Na primjer plazmu bi se moglo potaknuti na emitiranje zračenja u ultraljubičastom spektru. Budući da voda dubine do 1 metra može absorbirati ultraljubičasto zračenje to zračenje onda može tekućina upiti te se time može izvršiti desalinizacija i sterilizacija vode u velikim količinama, preraditi kanalizacijske vode, ili se izravno pretvoriti u električnu energiju (u ćelijama tekućih goriva). Ta metoda otklanja problem prenošenja topline s površine na tijelo tekućine, čime se ograničava postupak zagrijavanja.

Osposobiti funkcioniranje plazme

Eastlund i Gough daju potankosti i matematičke jednadžbe u svom pismenom radu iz 1969. glede atomskog sastava plazme, njene brzine protoka i gubitaka energije. Područje II u grafikonu baklje (**Prikaz 5a**) izgrađeno je kao područje gdje se svaki neutron kojeg proizvede izvor fuzije (Područje I), naročito u ciklusu stapanja deuterija i tricija, izolira uhvativši ga u pokrivač od litija (**Prikaz 5b**). Rezultirajuća plazma koja vrši rad u Području III, kao i plazma u cijeloj fuzijskoj baklji imala bi svoju gustoću, temperaturu i brzinu toka pod kontrolom metoda koje su već bile istražene u 1969. godini.

U svom radu iz 1971. Eastlund i Gough prikazuju nacrt fuzijske baklje za recikliranje krutog otpada, za koju kažu da bi se uklapala „sasvim prirodno u cjelokupnu sliku“ tada planiranih postrojenja obrade otpada (**Prikaz 6**). Kruti otpad bi se izmrvio, osušio i sortirao i zatim bi se različite kombinacije ubrizgale u plazmu fuzijske baklje da se ispari, rastvori i ionizira. Krajnji proizvodi bi se zatim odijelili u specifične elemente za sabiranje i vraćanje u prvobitno stanje. Energija korištena da se proizvede plazma mogla bi se isto tako povratiti u većem dijelu jer sustav radi na tako visokim temperaturama.

Ionizacija krutih tvari nastaje pri absorpciji energije plazme u površinskom sloju tvari proizvodeći tako udarni val koji je ispari i ionizira. To je moguće samo s plazmom ultravisokih temperatura, gdje je protok energije veći od brzine širenja udara u krutoj tvari i od energije potrebne isparavanju po jedinici obujma. Nastala plazma koja napušta Područje III fuzijske baklje bi se tad odijelila u sastavne elemente kod nižih temperatura.

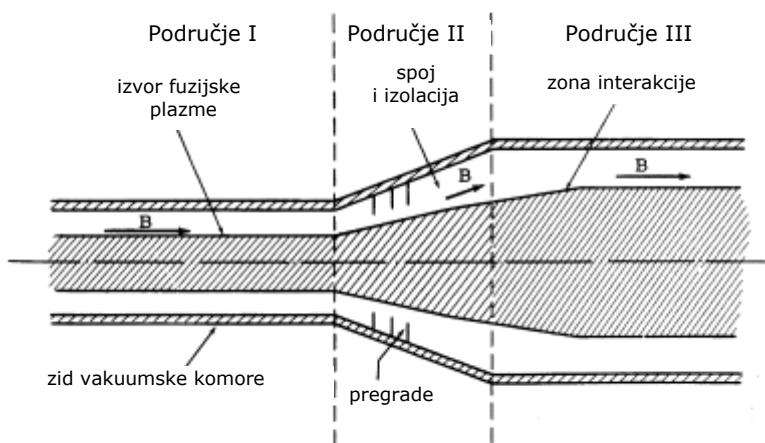
Eastlund i Gough raspravljaju nekoliko postupaka odjeljivanja ioniziranih krutih tvari u sastavne elemente, koji bi se svi mogli obraditi u istom postrojenju za povrat materijala. Elektromagnetsko odjeljivanje je na vrhu popisa. U svom radu iz 1969. primjećuju da je prvenstveno zanimanje za odjeljivanje samo nekoliko elemenata s velikom razlikom u masi. Na primjer, za reduciranje rudače željeznog oksida (FeO_2) bilo bi potrebno odjeljivanje željeza (mase 56) od kisika (mase 16). Zapažaju da je u to vrijeme već došlo do napretka u fizici plazme i kontroliranju snopa, tako da je elektromagnetsko odjeljivanje postalo privlačnije kao tehnologija.

Još jedna zapažena tehnika, za koju su Eastlund i Gough mislili da bi imala niski kapitalni trošak i trebala nižu razinu energije je gašenje, ubrzano ohlađenje toka plazme ubrizgavanjem hladnijeg plina, pretakanje plazme preko hladne površine ili povećanje obujma toka plazme. To bi funkcioniralo kod redukcije rudače naročito visokokvalitetne rudače s nečistoćama, kod povrata elemenata kroz eutektiku (kombinacije niskih točki taljenja), legura, i metalnih otpadaka niske kvalitete, i eliminacije plastičnog i papirnato otpada. Ova metoda recikliranja mogla bi se koristiti, kažu Eastlund i Gough zajedno s „modificiranom tehnologijom plazme“ raspoloživom već tada 1969. godine.

Selektivna rekombinacija je još jedna tehnika odjeljivanja, gdje bi temperatura i gustoća plazme održavala uvjete koji bi omogućili rekombinaciju nekih elemenata u plazmi na zidovima komore fuzijske baklje, dok bi se druge „iscijedilo kroz odvođe“. Ta metoda se temelji na ionizacijskim svojstvima danih tvari.

Prikaz 5a

Nacrt fuzijske baklje



Izvor: Bernard J. Eastlund and William C. Gough, "The Fusion Torch: Closing the Cycle from Use to Reuse," Washington, D.C. : U.S. Atomic Energy Commission, May 15, 1969 (WASH-1132).

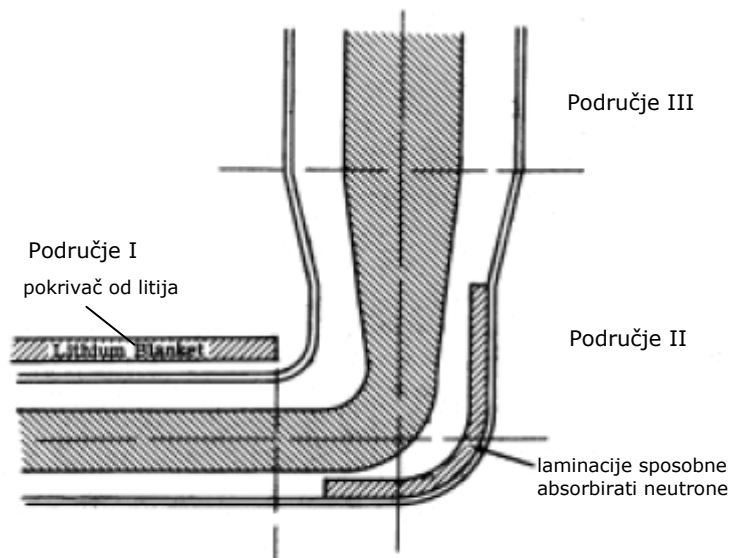
U ovom prijedlogu konfiguracije fuzijske baklje, plazma nastaje u prvom području, prenosi se kroz drugo područje u zonu interakcije gdje dolazi do obrade plazme. Područje II je zamišljeno za korištenje samo dijela plazme proizvedene u fuzijskom uređaju koja se onda usisava i unosi u baklju prilagođavanjem oblika i jačine magnetskog polja.

Četvrta tehnika koju predlažu u svom radu od 1969. je izmjena naboja. Kod te metode snopom bi se plina poprskala struja tekuće plazme iz fuzijske baklje i atom ili molekula u ubrizganom plinu zamijenila bi odabrani ion u plazmi. Željena kombinacija bi se skupljala na zidu komore baklje, dok bi se ostatak tvari magnetski otpremio van.

Ova metoda odjeljivanja bi također ovisila o stanju u koje bi fuzijska baklja pretvorila u krutu tvar. Eastlund i Gough naveli su četiri različite faze: (1) pretvorba krute tvari u plinsko stanje, (2) potpuna disocijacija molekula, (3) povišenje temperature plina do točke kad dolazi do ionizacije određenih elemenata, i (4) povišenje temperature plina do točke gdje dolazi do ionizacije svih elemenata.

Prikaz 5b

Oplemenjivanje plazme fuzijske baklje



Izvor: Bernard J. Eastlund and William C. Gough, "The Fusion Torch: Closing the Cycle from Use to Reuse," Washington, D.C. : U.S. Atomic Energy Commission, May 15, 1969 (WASH-1132).

Pokrivač od litija u Području I i laminacije za absorpciju neutrona uklanjaju sve neutrone prisutne prije nego radna plazma stigne do Područja III fuzijske baklje.

Sposobnost pretvaranja krutog otpada u te faze na selektivnoj bazi omogućuje korištenje kombinacije metoda da bi se na najjeftiniji način reduciralo kruti otpad u njegove sastavne elemente. Na primjer glavni teški elementi u krutom otpadu (aluminij, bakar, magnezij, kositar, željezo, olovo, itd.) mogli bi se ionizirati kod temperature od oko 10,000 K, odijeliti i izvaditi, dok bi lakši elementi (ugljik, kisik i vodik) mogli ostati kao neutralni plinovi i obradilo bi ih se kemijski. Eastlund i Gough su proračunali da bi taj parcijalni proces ionizacije uštedio oko 35,000 kW/h energije.

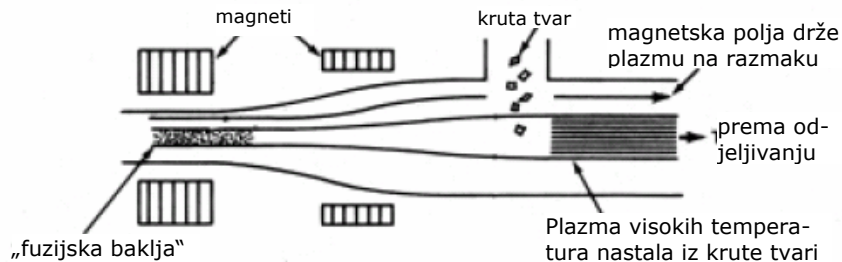
Ima li ikakvih problema u razvitku fuzije i baklje plazme ultravisokih temperatura? Da, naravno da ima. Kon-

trola plazme je veoma šakaljiva, radi se s golemom energijom, i potrebom razvoja

novih tvari. No to je soj problema i izazova koji se daju riješiti—ako ih hoćemo riješiti.

Prikaz 6

Grafikon obrade krutog otpada u fuzijskoj baklji



U ovoj predloženoj konstrukciji Područja III fuzijske baklje, fuzijska plazma, magnetski kontrolirana, prelijeva se preko ubrizganog krutog otpada, ionizirajući ga tako da ga se može odijeliti na njegove sastavne elemente

Izvor: Bernard J. Eastlund and William C. Gough, "Energy, Waste, and the Fusion Torch," Washington, D.C.: U.S. Atomic Energy Commission, April 27, 1971.

Gdje stojimo danas

Gough i Eastlund zaključuju svoje izvješće iz 1969.:

Ultravisoke temperature plazmi raspoložive su *sad*, iako uz veliku cijenu energije. Malo razmišljanja se potrošilo u njihovu potencijalnu uporabu u industrijske primjene, a nije ni previše stvaralačke mašte utrošeno u izvlačenje najviše koristi iz jedinstvenih svojstava fuzijskih plazmi koje će biti na raspolaganju u budućim kontroliranim izvorima termonuklearne energije. Ne pokušavajući umanjiti veliku količinu istraživanja u samu fuziju i fiziku fuzijske baklje, zanimljivo je nagađati o vizijama koje ova koncepcija pruža budućnosti—veliki gradovi, koji koriste električnu energiju iz čistih, sigurnih fuzijskih reaktora koji uklanjaju gradski otpad i stvaraju sirovine potrebne gradu.

Vizija je tu, a njeno postignuće, izgleda, ne spriječava ni priroda. Dostignuća će ovisiti o volji i želji ljudi.

Pa onda, gdje stojimo danas? Još nemamo ni fuziju ni fuzijsku baklju. Kao što je Eastlund rekao pred 'Zakladom za energiju fuzijom' još 1975., vrsta istraživanja potrebnog razvitku fuzijske baklje se ne provodi. „Potrebna bi bila“, rekao je, „privrženost odgovorne agencije za financiranje koja bi snažno poduprla fiziku, kemiju i tehnologiju primjene fuzijske baklje“.

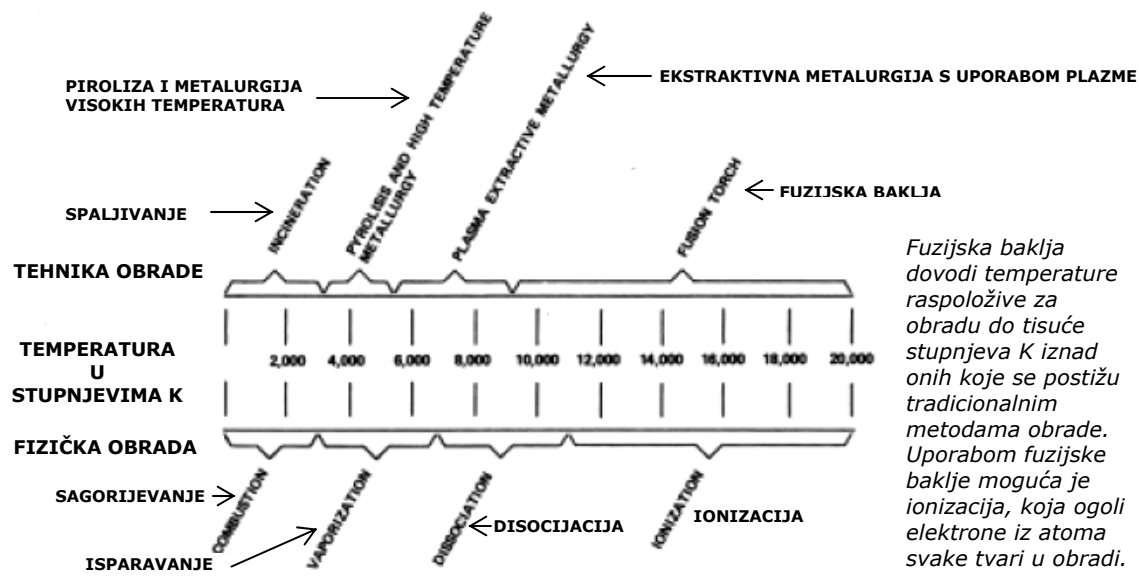
Tridesetpet godina kasnije privrženost tome još uvijek ne postoji u SADu. No baklje plazme na nižim temperaturama ugradile su neke tehnike koje su Eastlund i Gough istraživali i te se baklje sad koriste u industriji. Sveučilišta, nacionalni laboratoriji, i mnoge privatne tvrtke istraživale su obradu plazmom i koriste baklje plazme. Plazme se zagrijavaju mikrovalovima ili puštanjem plina kroz električni luk između dviju elektroda u generator plazme. **Prikaz 7** prikazuje radne temperature fuzijske baklje i konvencionalne metode obrade tvari.

Rusi i drugi koristili su obradu plazmom baklji na nižim temperaturama u proizvodnji čelika iz metalnog otpada. Istočni Nijemci i Sovjeti razvili su proces u kasnim šezdesetim godinama i komercijalizirali ga nakon 1970. U to vrijeme njihova baklja argonske plazme na istosmjernu struju smanjila je trošak proizvodnje čelika za \$400 po toni u usporedbi s konvencionalnim visokim pećima na električni luk. Smanjila je također i razinu buke s 140 dB na samo 40 dB. Baklja argonske plazme proizvela je temperature od 15,000°C u usporedbi s maksimalnom temperaturom od 3,600°C kod konvencionalnih visokih peći koje koriste električnu energiju.

Japanci su razvili fuzijski sustav zvan 'Vrsta fuzijskog sustava spaljenog pepela [uz uporabu] plazme', s demonstracijskim postrojenjem u gradu Čiba za recikliranje pepela iz spalionice i redukciju krutog otpada.

Prikaz 7

Radne temperature kod tehnike spaljivanja i ekstrakcije



Izvor: Bernard J. Eastlund and William C. Gough, "Energy, Waste, and the Fusion Torch," Washington, D.C.: U.S. Atomic Energy Commission, April 27, 1971.

Danas, Ben Eastlund drži tri patenta tehnike obrade plazmom koje bi mogle obaviti zadaću čije su glavne crte navedene u njegovu radu iz 1969. Konkretno, Eastlund je nedavno predložio da se njegova Fuzijska baklja/Large Volume Plasma Processor [Plazma procesor velikih volumena] ili LVPP primjeni za recikliranje potrošenog nuklearnog goriva civilnih nuklearki i otpada u cisternama (zavarenim spremištima) iz programa nuklearnog naoružanja Ministarstva energije. LVPP bi koristio ultravisoke temperature plazme za ekstrakciju radioaktivnih sastojaka iz hrpe otpada koristeći „suhi“ postupak za razliku od konvencionalnih tehnika koje koriste kiseline ili otopljene metale, a prototip bi mogao biti u funkciji za dvije godine. Na svojoj 'web' stranici (<http://www.Eastlundscience.com>) Eastlund piše:

Plazma procesor velikih volumena može se koristiti za odjeljivanje elemenata u otpadu, i to na osnovi element-po-element. Elementi koji nisu radioaktivni mogu se vratiti u okoliš nakon što se provjeri da ne postoje radioaktivni elementi među njima. Radioaktivne sastojke bi se izvadilo u obliku prikladnom za industrijsku uporabu, uvelike smanjivši količinu tvari namijenjenih geološkoj pohrani. Štoviše, budući da temperatura LVPPa od

10,000,000 stupnjeva može ionizirati svaku tvar, nedefinirana priroda tvari u cisternama ne predstavlja problem.

LVPP bi mogao značajno smanjiti financijski rizik nastavljanja čišćenja hanfordskih cisterni. Pristup uporabe „moke kemije“ zahtijeva konstrukciju ogromnih postrojenja koje treba financirati prije početka obrade. Godine će proći prije nego što će se za njihov rad moći reći da je siguran uspjeh. Svaki problem, kao što je curenje tekućine, ili eksplozija u nekom manjem dijelu otegnula bi izvedbu i stajala milijune u isplatama za čišćenje. LVPP, relativno mali sustav, odmah počinje odvajati radioaktivne tvari. Tvar se ubrizga kao (muljevita) otopina, ionizira se u 300-milijuntom dijelu sekunde, i odijeli se za manje od 25 ms. Odvojena tvar se može (iz)vaditi po potrebi, bez prekida za mnoge elemente da se osigura da nikad nema opasnog inventara u sustavu. Kad se cisterna očisti LVPP se može lako odstraniti s lokacije. Ustvari, same cisterne se može obraditi LVPPom.

Fuzijska baklja u obliku LVPPa ili drugim oblicima pruža nadu da će snabdjeti svijet novim resursima i ukloniti naše smeće i otpad bez zagađivanja. Kao što Eastlund gore predlaže fuzijska baklja može pretvoriti čak i kontejnere radioaktivnog otpada u

uporabljive stvari! Što čekamo? Svaki onaj koji se istinski brine za očuvanje okoliša morao bi se s ushićenjem priključiti pobjedničkoj strategiji tehnologija 21. stoljeća umjesto da gmiže u zlokoban udes, tamu i hladnoću kamenog doba.