

NUKLEARNI GORIVNI CIKLUS

Nuklearni gorivni ciklus odnosi se na niz povezanih aktivnosti kojima se dobiva sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i vodi briga o spremanju i odlaganju istrošenog goriva. Nuklearni gorivni ciklus se razdvaja na unutarnji i vanjski gorivni ciklus.

Pod unutarnjim gorivnim ciklusom podrazumijevaju se sve aktivnosti nakon dolaska svježeg goriva u elektranu pa do izlaska istrošenog goriva iz elektrane. Tu spada spremanje svježeg goriva, punjenje reaktora, premještanje goriva u reaktoru, vađenje i odlaganje istrošenog goriva u elektrani, proračuni i mjerenja izgaranja.

Vanjski gorivni ciklus čine sljedeće aktivnosti:

- prospekcija urana, dobivanje i prerada rude
- konverzija i obogaćivanje
- izrada goriva
- transport goriva
- prerada goriva
- odlaganje goriva i produkata prerade

Nadalje, nuklearni gorivni ciklus. Može biti otvoren ili zatvoren. Kod potpuno otvorenog gorivnog ciklusa podrazumjeva se odlaganje istrošenog goriva bez prethodne prerade, dok se kod potpuno zatvorenog gorivnog ciklusa podrazumjeva upotreba oplodnih reaktora u kombinaciji s preradom istrošenog goriva. Redoslijed i povezanost pojedinih faza gorivnog ciklusa prikazani su na donjoj slici.

Izvori nuklearnog goriva

Nuklearno gorivo je materijal koji sadrži atomske jezgre nekih teških kemijskih elemenata kojima se mogu ostvariti nuklearni procesi za oslobađanje energije.

Većina nuklearnih goriva sadrže teške nuklide koji uzrokuju lančanu reakciju nuklearne fisije u nuklearnom reaktoru. U najčešća nuklearna goriva ubrajaju se tri fisilna nuklida : uranij-235 (^{235}U), plutonij-239 (^{239}Pu) i uranij-233 (^{233}U). Samo jedan od njih nađen je u prirodi više nego u tragovima, a to je izotop ^{235}U . On čini samo oko 0,7% prirodnog elementa uranija, stoga se taj materijal zove prirodno ili primarno nuklearno gorivo.



Slika Nuklearni gorivni ciklus

Druga dva teška nuklida, ^{239}Pu i ^{233}U , dobivaju se u nuklearnim reaktorima. Bombardiranjem neutronima od ^{238}U nastaje ^{239}Pu , a od ^{232}Th nastaje ^{233}U - to su sekundarna nuklearna goriva, a ^{238}U i ^{232}Th od kojih nastaju ta sekundarna goriva nazivaju se oplodnim materijalima.

Izvorni materijali za nuklearno gorivo, uranij i torij, široko su rasprostranjeni u Zemljinoj kori te predstavljaju veliki energetske potencijali. Njihova ukupna količina do dubine od oko 5 km procijenjena je na približno $12 \cdot 10^{12}$ t.

Najveći dio tih elemenata rijetko se susreće u koncentracijama ekonomičnim za eksploataciju, međutim, moguće je iz umjereno siromašnih ruda, sa sadržajem od oko 0,1% uranija, dobiti 20 do $30 \cdot 10^6$ t uranija i nekoliko milijuna tona torija. Oni imaju više od deset puta veći energetske potencijal nego sve postojeće zalihe fosilnih goriva (ugljen, nafta, plin).

Izvori urana

Za rad današnjih komercijalnih nuklearnih elektrana, te za planiranje nuklearne energetske budućnosti, od iznimnog je značenja poznavanje svjetskih zaliha urana, kao osnovnog nuklearnog goriva. Poznate dohvatljive zalihe urana 2007. godine iznosile su približno 5,5 milijuna tona. Kako godišnja potreba za uranom iznosi približno 65 000 t, proizlazi da te zalihe zadovoljavaju za sljedećih 80-tak godina.

Uran je relativno čest metal kojeg nalazimo u stijenama i morskoj vodi. Uran je 1789. godine otkrio njemački kemičar Martin Heinrich Klaproth u uranovom smolincu, koji je danas jedna od najvažnijih uranovih ruda. Ime je dobio po planetu Uranu otkrivenom osam godina ranije. Atomski broj urana je 92 (92 protona i 92 elektrona) i pripada skupini aktinida u periodnom sustavu elemenata. Uran je čest element u zemljinoj kori, a u malim koncentracijama nalazimo ga u tlu, stijenama i vodi. U čistom, elementarnom stanju, uran je srebrno–bijeli, razmjerno mekan i vrlo težak radioaktivni metal (relativna gustoća 18.7). U zraku oksidira i potamni. Smrvljen u prah polako reagira s hladnom vodom, a brže s vrućom vodom. Spojevi urana su visokotoksični i imaju kumulativni efekt.

Kao i ostali elementi, uran se u prirodi pojavljuje kao smjesa različitih izotopa koji se međusobno razlikuju po broju neutrona. Glavni izotopi prirodnog urana, s pripadajućim težinskim udjelima, su: ^{238}U (99.283%), ^{235}U (0.711%) i ^{234}U (0.006%). Izotop ^{238}U je polazni („roditelj“) izotop uranovog radioaktivnog niza s vremenom poluraspada od 4.47 milijardi godina, a izotop ^{235}U je „roditelj“ aktinijevog radioaktivnog niza s višestruko kraćim vremenom poluraspada od 704 milijuna godina.

Učestalost urana obično se izražava u jedinicama ppm – „parts per million“ (dijelova na milijun). Tipične koncentracije urana su dane u donjoj tablici:

Uranij se u prirodi najčešće nalazi u obliku oksida ili silikata. Poznato je više od 200 minerala koji sadrže uran ali je zbog male koncentracije za eksploataciju interesantan mali broj minerala: uraninit(pitchblenda), branerit, euksenit, karnotit, kofinit, davidit i torbernit. Za eksploataciju torijuma značajni su: monazit, torit i granerit.

Rezerve urana računaju se u tonama koncentrata prirodnog urana, a cijene proizvodnje urana računaju se na bazi cijene eksploatacije jednog kilograma ili jedne tone koncentrata urana.

Proizvedeni koncentrat prirodnog urana najčešće je u formi uranovog oksida U_2O_3 (žuti kolač).

Tablica Tipične koncentracije urana

Ruda/Nalazište	Koncentracija
Uranova rudača vrlo visoke kvalitete – Kanada (20% U)	200000 ppm U
Uranova rudača visoke kvalitete (2% U)	20000 ppm U
Uranova rudača niske kvalitete (0.1% U)	1000 ppm U
Uranova rudača vrlo niske kvalitete – Namibija (0.01% U)	100 ppm U
Škriljci	10 – 100 ppm U
Granit	3 – 5 ppm U
Zemljina kora	3 ppm U
Sedimentne stijene	2 – 3 ppm U
Morska voda	0.003 ppm U



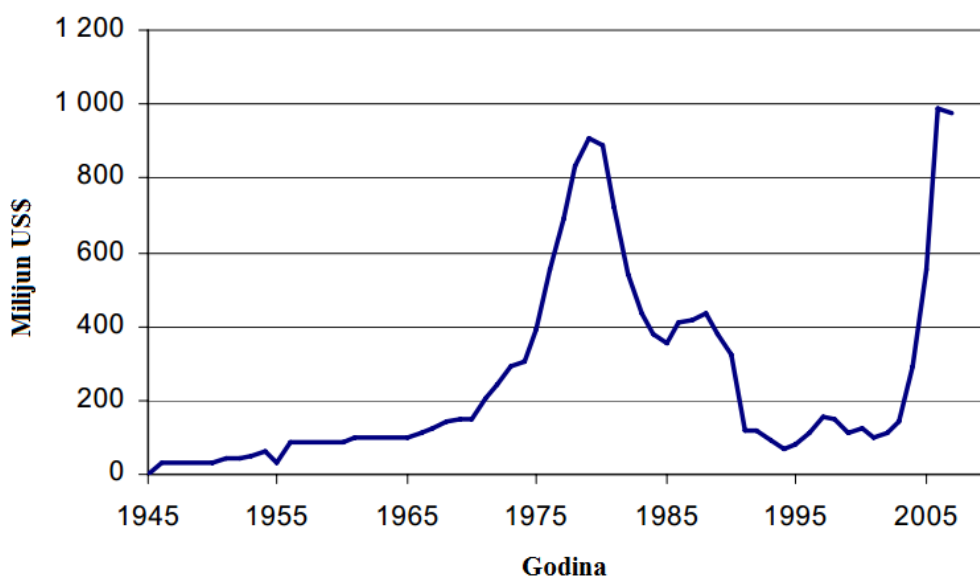
Slika Proizvodnja žutog kolača



Slika Uranij- srebrnasta krutina

Svjetske zalihe urana

Za razvoj nuklearne energetike i planiranje energetske budućnosti od velike je važnosti poznavanje dostupnosti zaliha urana, kao osnovnog nuklearnog goriva. Od 1945. godine razlikujemo četiri faze u istraživanju zaliha urana. Od 1945. godine do 1958. godine zalihe urana istraživane su prvenstveno u vojne svrhe. Od 1974. godine do 1983. pojačano se istražuju ležišta urana zbog potreba energetskog sektora. Od 1985. godine do 2003. godine gotovo i nije bilo istraživanja vezanih uz zalihe urana, da bi se ta istraživanja ponovo intenzivirala 2005. godine. Ukupna ulaganja u istraživanje zaliha urana prikazana su na donjoj slici. Agencija za nuklearnu energiju (*Nuclear Energy Agency*) u suradnji s Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*) svake dvije godine objavljuje izvješće o stanju svjetskih zaliha urana u tzv. *Crvenoj knjizi (Red Book)*.



Slika Ulaganje u istraživanje zaliha urana

Poznato je oko 80–ak uranovih minerala, od kojih najviše desetak dolazi u obzir kao rude. Najvažniji su uranov smolinac ili uranit, karnotit i tobernit. Uran je u početku smatran veoma rijetkim i oskudnim resursom, no istraživanja su pokazala da je on čest element u zemljinoj kori s prosječnom koncentracijom oko 3 ppm (*Parts Per Million*), a nalazimo ga u tlu, stijenkama te u morskoj vodi. Globalno gledano, uran je rasprostranjen po svim kontinentima, a najveća ležišta nalaze se u Australiji, Kazahstanu i Kanadi.

Uran se vadi površinskim ili dubinskim iskopom. Poteškoće kod iskapanja urana javljaju se zbog prosječno malene koncentracije urana u rudi i nepovezanim zonama koje sadrže rudu, što zahtijeva iskop znatnih količina jalovine. Zbog toga je cijena urana u uskoj vezi s njezinom prosječnom koncentracijom u ležištima, pa se javlja izazov u pronalaženju područja s dovoljnom koncentracijom urana kako bi njegova eksploatacija bila ekonomski prihvatljiva. Budući da je uran u rudi pomiješan s drugim mineralima, potrebno je rudu kemijski i mehanički obraditi kako bi se izdvojio uranov peroksid – U_3O_8 . U novije vrijeme razvijen je postupak dobivanja urana podzemnim ispiranjem (*In-Situ Recovery*), čime se zaobilazi potreba za iskapanjem rude, a mogu se iskoristiti i ležišta s manjim koncentracijama urana.

Komercijalni reaktori i potrošnja urana

Prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju iz svibnja 2013. godine, danas je u pogonu 436 energetske reaktora ukupne instalirane snage 372.68 GW_e. U izgradnji je dodatnih 68 reaktora, u 14 zemalja, ukupne instalirane snage 65.48 GW_e. Ukupna godišnja

količina urana potrebna za pogon današnjih reaktora iznosi oko 68 tisuća tona. Broj različitih tipova reaktora danas u pogonu dan je u donjoj tablici.

Tablica Tipovi energetskih reaktora danas u pogonu

Tip reaktora	Broj reaktora u pogonu	Udio u proizvodnji
Tlakovodni reaktor (PWR)	264	60.55%
Kipući reaktor (BWR)	92	21.1%
Teškovodni reaktor (PHWR)	44	10.09%
Grafitom moderirani reaktor (LWGR)	16	3.67%
Napredni plinom hlađeni reaktor (AGR)	14	3.21%
Plinom hlađeni reaktor (GCR)	4	0.92%
Brzi oplodni reaktor (FBR)	2	0.46%

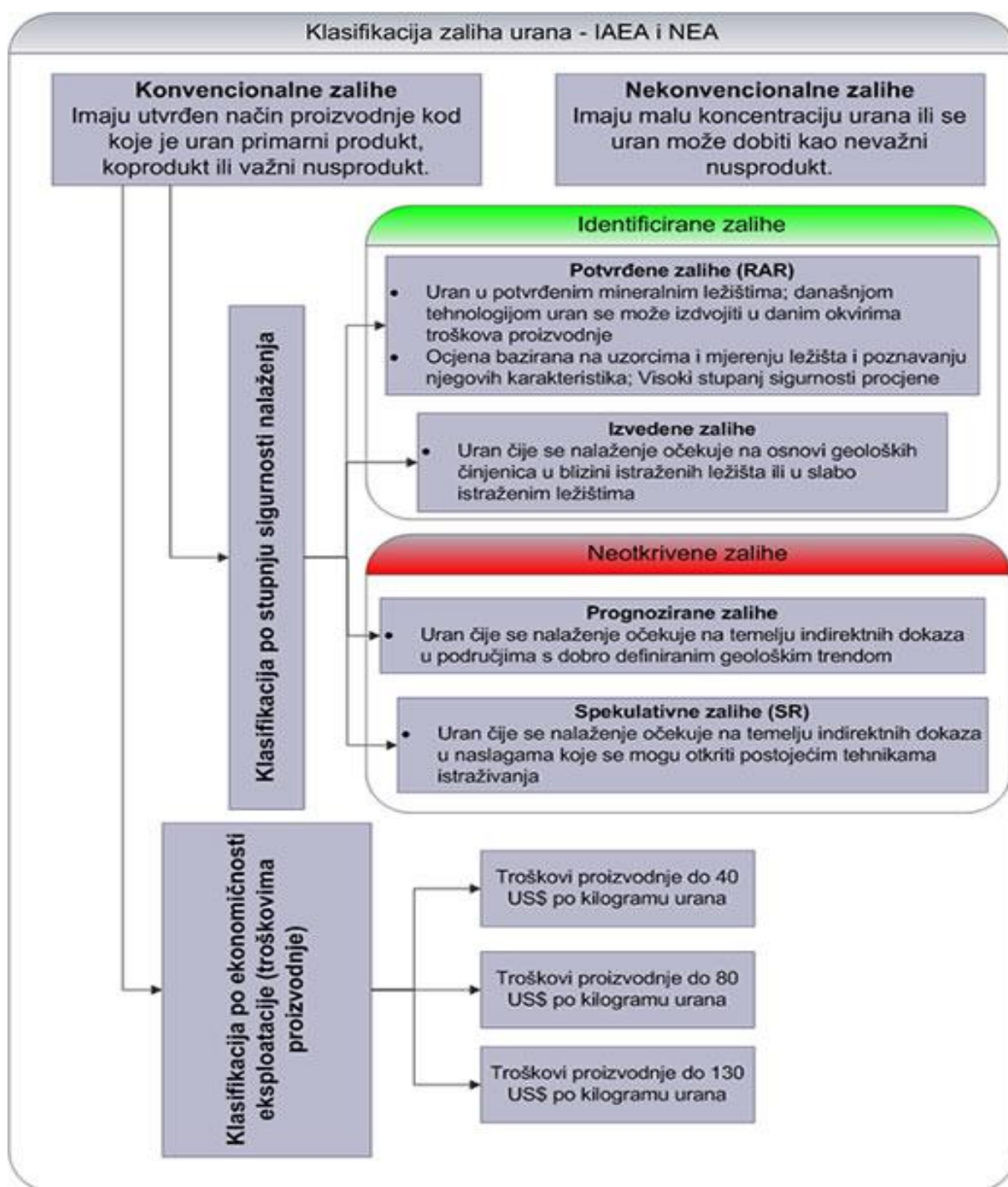
Lakovodni reaktori imaju ukupan udio preko 80% u proizvodnji električne energije iz nuklearnih elektrana, a posebno se ističe upotreba reaktora sa vodom pod tlakom. Zbog svojih pozitivnih osobina prvobitna primjena tlakovodnih reaktora bila je za propulziju plovila. Osim energetskih reaktora danas je u pogonu oko 250 istraživačkih, a dodatnih 180 reaktora koristi se za pogon vojnih plovila (podmornice, brodovi, nosači aviona).

Klasifikacija zaliha urana

Izvori urana podijeljeni su u dvije opće kategorije: konvencionalni i nekonvencionalni. Konvencionalni izvori su oni koji imaju ugodanu povijest proizvodnje u kojoj je uran glavni proizvod, koproizvod ili nusproizvod.

Nekonvencionalni izvori su izvori niže kvalitete, odnosno oni iz kojih se uran može dobiti samo kao manji (sporedni) nusproizvod.

Procjene izvora podijeljene su u zasebne kategorije, prema različitim razinama pouzdanosti nalazišta urana, te prema cijeni proizvodnje. Kategorizacija zaliha urana koju koriste Međunarodna agencija za atomsku energiju i Agencija za nuklearnu energiju prikazana je na donjoj slici.



Slika Kategorizacija zaliha urana

Konvencionalne zalihe urana

Svjetske zalihe urana dijelimo u dvije kategorije, pa tako razlikujemo konvencionalne zalihe, gdje je uran primarni produkt, koprodukt ili važni nusprodukt, od nekonvencionalnih zaliha, gdje se uran dobiva kao nevažni nusprodukt ili se radi o ležištima s vrlo niskom

koncentracijom urana. Prema *Crvenoj knjizi* konvencionalne zalihe urana klasificirane su po stupnju sigurnosti nalaženja i po troškovima proizvodnje urana.

Po stupnju sigurnosti nalaženja konvencionalne zalihe urana dijelimo u dvije skupine: identificirane zalihe i neotkrivene zalihe. Identificirane zalihe dijelimo na potvrđene zalihe urana kojeg je moguće proizvesti današnjom tehnologijom uz prihvatljive troškove, i na izvedene zalihe urana čije se nalaženje očekuje na temelju geoloških podataka u blizini istraženih ležišta. Neotkrivene zalihe dijelimo na prognozirane i spekulativne zalihe. Prognozirane zalihe urana odnose se na područja s dobro definiranim geološkim trendom gdje postoje indirektni dokazi o mogućnosti nalaženja urana. Spekulativne zalihe pretpostavljaju postojanje ležišta urana u geološki povoljnim ali još uvijek neistraženim područjima.

Druga klasifikacija konvencionalnih zaliha urana odnosi se na ekonomičnost eksploatacije ležišta, tj. na troškove proizvodnje urana. U ovoj kategoriji razlikujemo četiri slučaja: troškovi proizvodnje manji od 40 USD/kgU, troškovi proizvodnje manji od 80 USD/kgU, troškovi proizvodnje manji od 130 USD/kgU i troškovi proizvodnje do 260 USD/kgU. Konvencionalne zalihe urana klasificirane prema sigurnosti nalaženja i troškovima proizvodnje prikazane su u donjim tablicama.

Tablica Identificirane konvencionalne zalihe urana

		Troškovi proizvodnje			
		40 USD/kgU	80 USD/kgU	130 USD/kgU	260 USD/kgU
Identificirane zalihe (u tonama)	Potvrđene	493 900 tU	2 014 800 tU	3 455 500 tU	4 378 700 tU
	Izvedene	187 000 tU	1 063 700 tU	1 871 700 tU	2 717 900 tU
	Ukupno	680 900 tU	3 078 500 tU	5 327 200 tU	7 096 600 tU

Identificirane zalihe urana, a naročito potvrđene zalihe, predstavljaju najvažniju kategoriju kod promatranja raspoloživih rezervi urana. Graničnom cijenom danas se smatra cijena do 130 USD/kgU (50 USD/lbU₃O₈). Najskuplja cijenovna kategorija od 260 USD/kgU zanimljiva je za razmatranje zbog mogućnosti povećanja ukupnih troškova proizvodnje urana u skoroj budućnosti. Uz današnju potrošnju od 68 tisuća tona urana godišnje potvrđene zalihe urana, do cijene 130 USD/kgU, dostatne su za sljedećih 50–ak godina, a ukupne identificirane zalihe do 130 USD/kgU dostatne su za sljedećih 80–ak godina.

Tablica Neotkrivene konvencionalne zalihe urana

		Troškovi proizvodnje			
		80 USD/kgU	130 USD/kgU	260 USD/kgU	Nedefinirano
Neotkrivene zalihe (u tonama)	Prognozirane	1 624 100 tU	2 698 000 tU	2 841 300 tU	–
	Spekulativne	–	3 543 800 tU	3 862 100 tU	3 733 200 tU
	Ukupno	1 624 100 tU	6 241 800 tU	6 703 400 tU	3 733 200 tU
		10 436 600 tU			

Prema gornjoj tablici ukupne neotkrivene zalihe urana do cijene 130 USD/kgU, uz današnju potrošnju, dostatne su za dodatnih 90–ak godina. Troškovi proizvodnje za kategoriju bez definirane cijene podrazumjevaju se u intervalu između 80 i 260 USD/kgU. Ukupne neotkrivene zalihe urana procijenjene su na 10.4 milijuna tona.

Tablica Ukupne konvencionalne zalihe urana

		Troškovi proizvodnje				
		40 USD/kgU	80 USD/kgU	130 USD/kgU	260 USD/kgU	Nedefinirano
Ukupne konvencionalne zalihe (u tonama)		680 900 tU	4 702 600 tU	11 569 000 tU	13 800 000 tU	3 733 200 tU
		17 533 200 tU				

Kao što je prethodno određeno ukupne konvencionalne zalihe (identificirane i neotkrivene) do cijene 130 USD/kgU iznose nešto više od 11.5 milijuna tona i dovoljne su za sljedećih 170 godina uz sadašnju potrošnju urana. Dodamo li tome zalihe urana iz višeg cjenovnog ranga i zalihe bez definirane cijene, dobivamo 17.5 milijuna tona ukupnih konvencionalnih zaliha koje su dovoljne za sljedećih 257 godina. Procijenjene zalihe mogu se smatrati kao sadašnja donja granica dostupne količine urana.

Period od otkrivanja ekonomski isplativog nalazišta urana do početka njegove eksploatacije nerijetko traje i više od 10–ak godina. Uran se dobiva različitim postupcima poput površinskog iskapanja, dubinskog iskapanja, podzemnog ispiranja ili kao nusprodukt, a oni imaju različit utjecaj na konačnu cijenu proizvodnje. U donjoj tablici prikazane su potvrđene zalihe urana u ovisnosti o načinu proizvodnje.

Tablica Potvrđene zalihe urana u ovisnosti o načinu proizvodnje

Način proizvodnje	Troškovi proizvodnje			
	40 USD/kgU	80 USD/kgU	130 USD/kgU	260 USD/kgU
Površinsko iskapanje	28 600 tU	99 600 tU	868 700 tU	1 286 000 tU
Dubinsko iskapanje	313 800 tU	428 900 tU	875 800 tU	1 272 000 tU
Ispiranje (kiselina)	80 400 tU	347 400 tU	438 700 tU	426 700 tU
Ispiranje (lužina)	0	36 600 tU	88 500 tU	111 000 tU
Koproduct/nusprodukt	71 100 tU	1 102 300 tU	1 150 700 tU	1 198 900 tU
Nedefinirano	0	0	33 100 tU	84 100 tU
Ukupno	493 900 tU	2 014 800 tU	3 455 500 tU	4 378 700 tU

Iz gornje tablice je vidljivo da je u najjeftinijoj kategoriji do 40 USD/kgU dominantna metoda dubinskog iskapanja, dok u sljedećoj cjenovnoj kategoriji dominiraju zalihe urana koje se mogu dobiti kao koproduct. U kategoriji do 130 USD/kgU možemo primijetiti značajno povećanje zaliha dostupnih klasičnim metodama iskapanja, a njihov udio još je značajniji u najskupljijoj cjenovnoj kategoriji. Metoda podzemnog ispiranja doprinosi u svim cjenovnim kategorijama, a pogotovo metoda ispiranja kiselim otopinama. Podzemno ispiranje lužnatim otopinama manje se koristi, a zbog manje efikasnosti postupka rezultira većim troškovima što je vidljivo iz danih podataka.

Najviše zaliha dostupnih dubinskim iskapanjem posjeduje Kanada, a Namibija i Nigerija imaju najveći udio zaliha dostupnih površinskim iskapanjem. Australijski rudnik bakra Olympic Dam ima najveći doprinos u zalihama dostupnih koprodukcijom, a važne udjele u toj kategoriji imaju još Južnoafrička Republika, te Brazil. Kazahstan je vodeća država po zalihama dostupnih metodom podzemnog ispiranja uz korištenje kiselih otopina, a slijedi ju Australija. Podzemno ispiranje lužnatim otopinama koristi se u SAD-u zbog prisustva karbonatnih minerala u ležištima.

Prema načinu proizvodnje urana, najveći udio urana u 2010. godini proizveden je metodom podzemnog ispiranja (39.34%), a očekuje se da će se taj udio povećavati u budućnosti. Slijede je metoda dubinskog iskapanja (31.75%) i metoda površinskog iskapanja (22.92%).

Geografska raspodjela identificiranih zaliha urana i udio tih zaliha u svjetskim identificiranim zalihama urana prikazana je u donjoj tablici.

Tablica Raspodjela identificiranih zaliha po državama i udio u svjetskim zaliham

Država	Zalihe urana (t)	Udio u svjetskim zaliham(%)
Australija	1 243 000	23
Kazakstan	817 000	15
Rusija	546 000	10
Južna Afrika	435 000	8
Kanada	423 000	8
SAD	342 000	6
Brazil	278 000	5
Namibija	275 000	5
Niger	274 000	5
Ukrajina	200 000	4
Jordan	112 000	2
Uzbekistan	111 000	2
Indija	73 000	1
Kina	68 000	1
Mongolija	62 000	1
Ostale	210 000	4
Ukupno	5 469 000	100

Nekonvencionalne zalihe urana

Osim konvencionalnih zaliha, kod kojih je uran primarni produkt, koprodukt ili važni nusprodukt, postoje i nekonvencionalne zalihe gdje se uran dobiva kao nevažni nusprodukt ili se radi o ležištima s vrlo niskom koncentracijom urana. Nekonvencionalne zalihe odnose se uglavnom na zalihe urana u fosfatnim stijenama, uljnim škriljcima, ugljenu i morskoj vodi.

Nekoliko desetaka tisuća tona urana proizvedeno je iz fosfatnih stijena, no ovaj je postupak postao ekonomski neisplativ 90-ih godina prošlog stoljeća zbog pada cijene urana. Zalihe urana u fosfatnim stijenama procijenjene su na 22 milijuna tona, što je dovoljno za dodatnih 323 godine opskrbe uranom uz današnju godišnju potrošnju od 68 tisuća tona.

Uljni škriljci uz organske tvari sadrže i različite koncentracije urana. Škriljci s visokom koncentracijom urana od 250 ppm do 300 ppm nalaze se u Švedskoj. Ukupne svjetske zalihe urana u uljnim škriljcima procijenjene su na 4.4 milijuna tona s prosječnom koncentracijom urana oko 50 ppm.

Ugljen prosječno sadrži samo oko 1 ppm urana, ali znatno veće koncentracije mogu se pojaviti u pojedinim ležištima. Povećane koncentracije urana nalaze se u više ležišta lignita u SAD-u, Španjolskoj i Kanadi.

Ekstrakcija urana iz morske vode je zanimljiva zbog vrlo velikih zaliha urana sadržanih u oceanima, koje su procijenjene na 4 milijarde tona. Istraživanja na ovom području rađena su u nekoliko zemalja svijeta od 50-ih do 80-ih godina prošlog stoljeća, a danas se istražuju samo u Japanu i SAD-u. Međutim, zbog vrlo male koncentracije urana u morskoj vodi, ovakav način proizvodnje je veoma skup i zahtjevan. Procijenjuje se da bi cijena tako dobivenog urana iznosila između 250 i 700 USD/kg.

U doglednoj budućnosti ne očekuje se značajna proizvodnja urana iz nekonvencionalnih izvora zbog njihovih visokih troškova proizvodnje, ali i zbog velikih količina konvencionalnih zaliha urana.

Sekundarne zalihe urana

Uran se od ostalih energenta razlikuje i po tome što se značajan dio potreba za uranom namiruje iz tzv. sekundarnih zaliha. Sekundarne zalihe, iako vrlo male u usporedbi s prije spomenutim zalihama urana, danas imaju značajnu ulogu u opskrbi nuklearnih elektrana gorivom. U sekundarne zalihe ubrajaju se civilne i vojne rezerve prirodnog i obogaćenog urana, fisibilni materijal dobiven reprocesiranjem istrošenog nuklearnog goriva, plutonij iz vojnih rezervi, te naknadno obogaćivani osiromašeni uran.

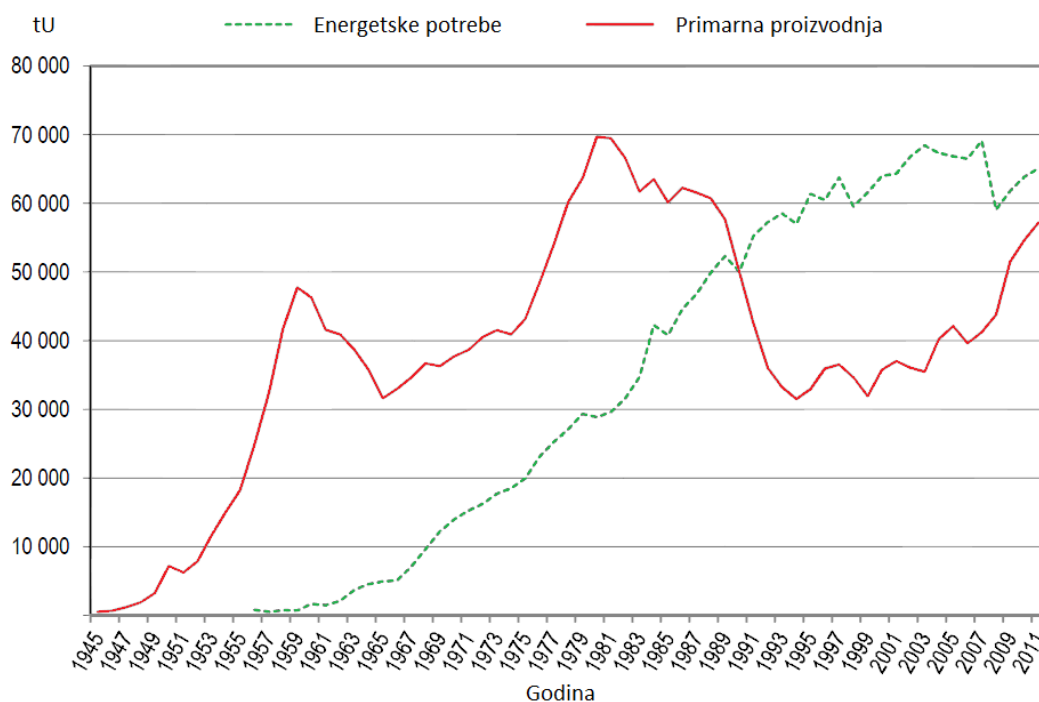
Vojne rezerve visoko obogaćenog urana (preko 90% izotopa ^{235}U) iskorištavaju se za pogon nuklearnih elektrana, a njima se namiruje oko 15% ukupnih godišnjih potreba za uranom. SAD i Rusija potpisali su 1993. godine sporazum o preradi i otkupu 500 tona visoko obogaćenog urana iz starih sovjetskih bombi pod nazivom „*Megatons to Megawatts*“. Sporazum ističe krajem 2013. godine, pa će biti potrebno nadomjestiti nastalu razliku proizvodnjom iz drugih izvora.

Posebno je zanimljiva upotreba osiromašenog urana koji je nastao kao nusprodukt tijekom procesa obogaćivanja urana. Iz jedne tone prirodnog urana postupkom obogaćivanja dobije se oko 130 kg 3.5% obogaćenog urana, a ostatak je osiromašeni uran. Svjetske zalihe

osiromašenog urana iznose oko 1.5 milijuna tona, a njihovim naknadnim obogaćivanjem može se proizvesti oko 565 tisuća tona ekvivalentnog prirodnog urana.

Odnos proizvodnje i potrošnje

Odnos proizvodnje i potrošnje urana danas je stabilan, unatoč korištenju različitih izvora za zadovoljavanje ukupne potražnje. Prema podacima iz 2010. godine dostupnima u *Crvenoj knjizi* ukupna godišnja potrošnja urana za potrebe pogona nuklearnih elektrana iznosila je 63875 tona. Od toga je oko 85% potreba osigurano proizvodnjom iz primarnih izvora (konvencionalne zalihe), a ostatak je dobiven iz sekundarnih izvora. Na donjoj slici ilustriran je odnos primarne proizvodnje i energetske potreba urana.



Slika Odnos proizvodnje urana iz primarnih izvora i energetske potreba za uranom

U 2010. godini uran su proizvodile 22 zemlje, a ukupna proizvedena količina iznosila je 54670 tona. U samo 8 zemalja svijeta proizvedeno je 93% ukupne količine urana. Vodeći proizvođači su Kazahstan (33%), Kanada (18%) i Australija (11%). Kazahstan je u razdoblju od samo dvije godine (2008. – 2010.) udvostručio proizvodne kapacitete i tako prestigao Kanadu, te postao vodeći svjetski proizvođač urana.

Nuklearne elektrane u pogonu su u 30 zemalja zbog čega je raspodjela proizvodnje i potrošnje neravnomjerna. U 2010. godini samo su Kanada i Južnoafrička Republika proizvele dovoljnu količinu urana da zadovolje vlastite potrebe, dok su ostale zemlje ovisne o uvoznom uranu i uranu iz sekundarnih izvora. Zbog neravnomjernosti proizvodnje i potrošnje međunarodna

trgovina uranom igra važnu ulogu, a također je važno osigurati siguran i pravovremeni transport nuklearnog goriva kako bi elektrane mogle nesmetano raditi.

Energetska vrijednost zaliha urana

Kao energent nuklearno gorivo se od fosilnih goriva razlikuje po tome što se prvenstveno koristi za proizvodnju toplinske, odnosno električne energije. Fosilna goriva imaju mnogo širu namjenu i koriste se u transportu, industriji i širokoj potrošnji. Iz tog razloga relativna energetska vrijednost zaliha urana mnogo je značajnija za energetske sektor od relativne energetske vrijednosti zaliha fosilnih energenata. Energetska vrijednost urana iznosi oko 500 GJ po kilogramu. Radi usporedbe u donjoj tablici prikazane su energetske vrijednosti zaliha urana i fosilnih goriva.

Tablica Energetske vrijednosti zaliha različitih goriva

	Energetska vrijednost utvrđenih zaliha	Energetska vrijednost potencijalnih zaliha
Ugljen	$41\,994 \cdot 10^{18} \text{ J}$	$142\,120 \cdot 10^{18} \text{ J}$
Nafta	$6\,113 \cdot 10^{18} \text{ J}$	$8\,360 \cdot 10^{18} \text{ J}$
Plin	$5\,903 \cdot 10^{18} \text{ J}$	$11\,681 \cdot 10^{18} \text{ J}$
Uran	$3\,548 \cdot 10^{18} \text{ J}^*$	$217\,566 \cdot 10^{18} \text{ J}^{**}$

*7 096 600 t (Ukupne identificirane konvencionalne zalihe do cijene 260 USD/kgU uz trenutnu tehnologiju)

**Ukupne konvencionalne zalihe do cijene 260 USD/kgU (17 533 200 t) + 80% rezerve urana u fosfatima (17 600 000 t) + 10% rezerve urana u morskoj vodi (400 000 000 t) što je ukupno 435 133 200 t (uz trenutnu tehnologiju)

Kako se današnja nuklearna tehnologija temelji na iskorištavanju energije oslobođene fisijom izotopa ^{235}U u termičkim reaktorima, to je energetske potencijal urana veoma slabo iskorišten, s tek oko 1%. Za usporedbu, uz ovakvo iskorištenje energetske potencijala urana, ukupna energetska vrijednost zaliha urana bitno je manja od energetske vrijednosti zaliha ugljena.

Iskorištenje energetske potencijala nuklearnog goriva moguće je djelomično poboljšati reprocesiranjem istrošenog nuklearnog goriva, a značajno poboljšanje donosi upotreba brzih oplodnih reaktora. Brzi oplodni reaktori danas su tehnički razvijeni, a mogu povećati energetske potencijal urana nekoliko desetaka puta čime bi problem iscrpljenja zaliha postao irelevantan. Međutim, zbog još relativno niske cijene urana ovi reaktori danas nisu ekonomski konkurentni. Smanjenjem zaliha urana u budućnosti, a samim time i povećanjem cijene urana, uloga oplodnih reaktora biti će sve značajnija za dugoročni razvoj nuklearne energetike.

Tržište

Cijena urana na tržištu podliježe zakonima ponude i potražnje. Nakon visoke cijene urana krajem 70-ih godina prošlog stoljeća, postepeno je uslijedio njen pad zbog smanjenog interesa za gradnju novih nuklearnih elektrana i zatvaranjima rudnika urana uzrokovano nesrećama u elektranama Three Mile Island 1979., Černobil 1986. te oslobađanjem dijela visoko obogaćenog urana iz vojnih rezervi. Tako je cijena urana na spot tržištu krajem 2000. godine dosegla minimum i iznosila približno 22 USD/kgU. Zbog jačanja interesa za obnovu gradnje nuklearnih elektrana i neizvjesnosti zaliha, cijena urana eksponencijalno je porasla sredinom prošlog desetljeća i u 2007. godini dosegla maksimum od preko 300 USD/kgU. Zbog globalne ekonomske krize 2008. i 2009. godine ponovno je uslijedio pad cijene na 100 USD/kgU, a početkom 2011. godine cijena je porasla na 180 USD/kg. Nuklearna nesreća, kao posljedica udara tsunamija, koja je zadesila Japan u ožujku 2011. godine uzrokovala je pad cijene urana na današnju vrijednost koja iznosi oko 100 USD/kgU. Važno je napomenuti da se navedeni iznosi odnose na spot tržište i podložni su promjenama na dnevnoj bazi, te obično predstavljaju samo manji udio u ukupnoj opskrbi uranom. Veći dio trgovanja uranom obavlja se putem dugoročnih ugovora, pa cijena urana nije u tolikoj mjeri podložna promjenama na spot tržištu, već je određena ugovorom između proizvođača i potrošača.

Procjena zaliha urana u različitim modelima

U Crvenoj knjizi date zalihe nuklearnih goriva predstavljaju procjene prikupljenih podataka o konvencionalnim zalihama urana u zemljama članicama IAEA. U mnogim zemljama su istražene zalihe urana ali postoje i zemlje koje ne prijavljuju zalihe u svim kategorijama, tako da gotovo sigurno postoje značajne količine urana koje nisu uključene u Crvenoj knjizi.

Stoga bi procjene zaliha urana u Crvenoj knjizi trebalo smatrati danas kao donju granicu količine urana koja će se vjerojatno moći realizirati.

Za analizu dugoročne održivosti zaliha urana potrebno je procijeniti količine urana koje će u konačnici pokazati kao ekonomski prihvatljive. Takve zalihe urana se definiraju kao ukupne dostupne zalihe urana. One ovise o geološkim parametrima kao i razvoju tehnologija za istraživanje, eksploataciju i korištenje. Ukupne dostupne zalihe urana mogu se odrediti iz osnovnih načela utvrđivanjem količina urana koje su prisutne u zemljinoj kori u ovisnosti o dostupnosti takvog urana i njegovoj koncentraciji.

Geološki podaci pokazuju da se ukupna količina urana povećava eksponencijalno sa smanjenjem cijene rude.

Sintezom eksponencijalnog zakona za ukupnu količinu urana i pretpostavkom da se cijena vađenja urana mijenja linearno s recipročnom vrijednosti koncentracije uranove rude dobivamo jedan jednostavan model količine urana u Zemljinoj kori:

$$(Q/Q_0) = (P/P_0)^\varepsilon$$

gdje je:

Q – količina urana (MtU) dostupna na razini cijene P (USD/kg U)

Q_0 – količina urana (MtU) dostupna na nekoj referentnoj cijeni P_0

ε – koeficijent dugoročne elastičnosti opskrbe uranom

Primjena ovog modela iziskuje odabir referentne točke (P_0 , Q_0) i procjene koeficijenta ε .

Podaci u Crvenoj knjizi mogu se koristiti kao polazne točke za ekstrapolaciju ukupno procijenjenih zaliha urana. Stoga, su zalihe urana od 0,796 MtU, dostupne po cijeni od 40 USD/kgU odabrane kao referentna točka. (Tablica)

Koeficijent dugoročne elastičnosti opskrbe uranom je procijenjen od različitih skupina i njegova vrijednost je u rasponu od 2.35 do 3.5. Svjetska nuklearna asocijacija (WNA) zaključuje da će udvostručenjem cijena od sadašnje razine doći do deseterostrukog povećanja zaliha urana tijekom vremena. To podrazumijeva da će koeficijent dugoročne elastičnosti opskrbe uranom ε biti jednak 3,32.

Još jedan ozbiljan pokušaj procjene koliko urana će vjerojatno biti dostupno u cijelom svijetu se temelji na Deffeyes and MacGregor (Deffeyes & MacGregor, 1980) raspodjeli urana u Zemljinoj kori. Ta raspodjela govori da je smanjenje koncentracije rude od 10 puta povezano s povećanjem raspoloživih zaliha urana od 300 puta. Koristeći pretpostavku da su troškovi obrnuto proporcionalni koncentraciji rude, dobivamo da je koeficijent elastičnosti opskrbe uranom ε jednak 2,48. U.S. Department of Energy Generation IV Fuel Cycle Crosscut Group, koristeći podatke o nedavnoj procjeni količine urana koje će biti dostupne za 30 i 50 USD/kgU u Sjedinjenim Američkim Državama je predvidio da koeficijent dugoročne elastičnosti opskrbe uranom ε može biti jako nizak, u ovome slučaju 2,35.

Korištenjem odabrane referentne točke i dobivene vrijednosti ϵ , ukupne pronađene zalihe urana se dobivaju jednostavnim modelom zemljine kore za različite raspone cijena. Dobivene vrijednosti kao i vrijednosti iz Crvene knjige dane u MtU su pokazane u donjoj tablici. Ove vrijednosti se kreću od 4 MtU za cijenu od 80 USD/kgU do gotovo 400 MtU za cijenu od 260 USD/kgU. Sve ove procjene govore da će ukupna količina urana pronađenog za cijenu od 130 USD/kgU i 260 USD/kgU vjerojatno biti znatno veća od iznosa koji su dani u Crvenoj knjizi.

Tablica Sveukupne procjene zaliha urana (MtU) od različitih institucija za različite cijene

Izvor procjene	ϵ	Cijena			
		< 40 USD/kgU	< 80 USD/kgU	< 130 USD/kgU	< 260 USD/kgU
WNA	3.32	0.796	7.96	39.84	397.91
Deffeyes and MacGregor	2.48	0.796	4.44	14.8	82.59
Generation IV-FCCG	2.35	0.796	4.06	12.70	64.75
Red Book		0.796	3.742	5.402	6.306

U daljnjoj analizi se pretpostavilo da će konvencionalne zalihe urana prema Crvenoj knjizi od siječnja 2009. u iznosu od 16,7 milijuna tona biti dostupne do 2065. godine.

Na temelju procjena dobivenih jednostavnim modelom zemljine kore, utvrdili smo da je ukupni dostupne zalihe urana do kraja stoljeća uz podnošljivu cijenu od 180 USD/kgU iznose 50 Mt. Ova procjena potvrđena je od strane MIT-a (Massachusetts Institute of Technology).

Iskapanje i prerada rudače

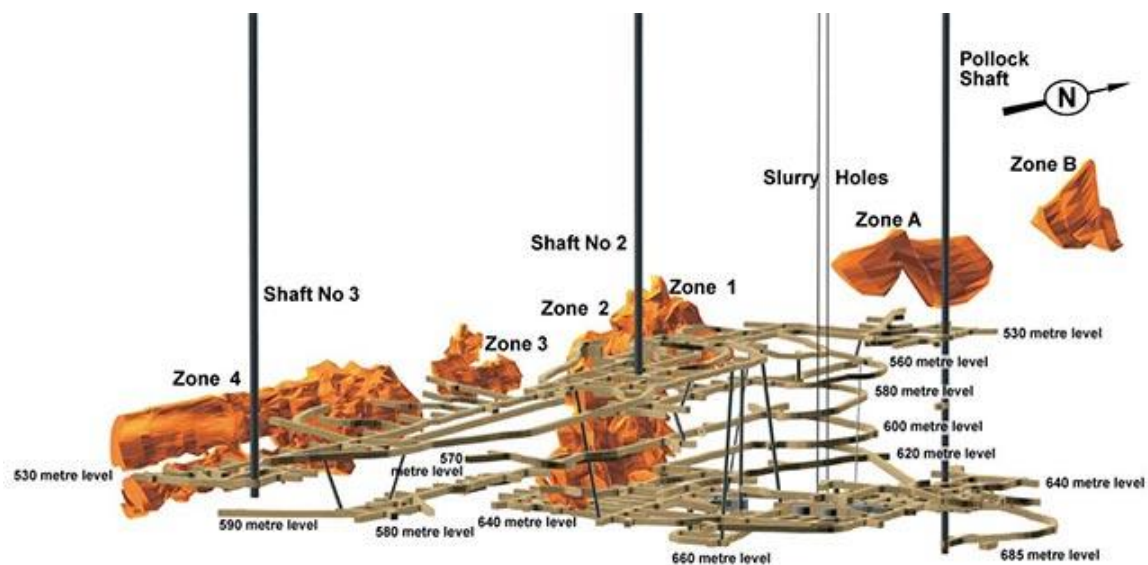
Klasičan način proizvodnje urana predstavljaju metode površinskog i dubinskog iskapanja. Tehnika iskapanja ne razlikuje se bitno od onih u rudnicima ugljena, osim što postoji dodatna opasnost od radioaktivnosti za osoblje rudnika.

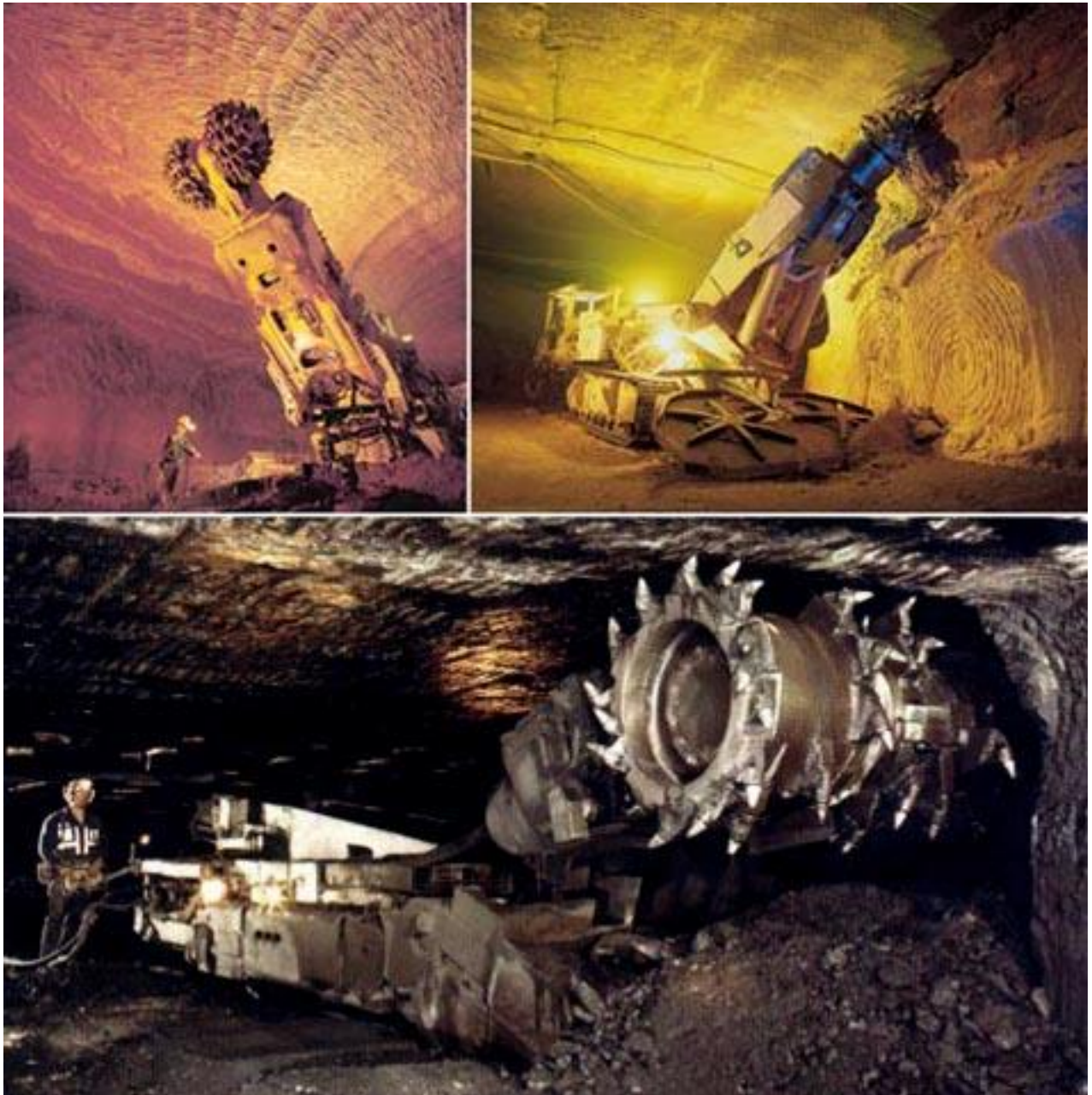
Metoda površinskog iskapanja koristi se kod plitkih ležišta urana (do 100 metara dubine), a sam rudnik zauzima vrlo veliku površinu. Do rudače se dolazi bušenjem i kontroliranim miniranjem pokrovnog sloja što znači da je potrebno odstraniti velike količine jalovine. Izložena rudača se zatim pomoću utovarivača i kipera prevozi do postrojenja za usitnjavanje rude. Radnici provode puno vremena u zatvorenima kabinama strojeva, ograničavajući izlaganje radijaciji, a rudnik se često natapa vodom radi suzbijanja prašine u zraku.



U slučaju da se ležište rude nalazi na dubini većoj od 100 metara koristi se metoda dubinskog iskapanja. Do rude se dolazi kroz vertikalna okna koja su na dubini povezana serijom horizontalnih tunela. Uranova ruda uklanja se različitim metodama ovisno o karakteristikama ležišta. Ova metoda zahtijeva uklanjanje manjih količina jalovine od površinske metode, ali zahtijeva i puno više mjera kako bi se osigurao siguran rad (ventilacija, podgrađivanje,

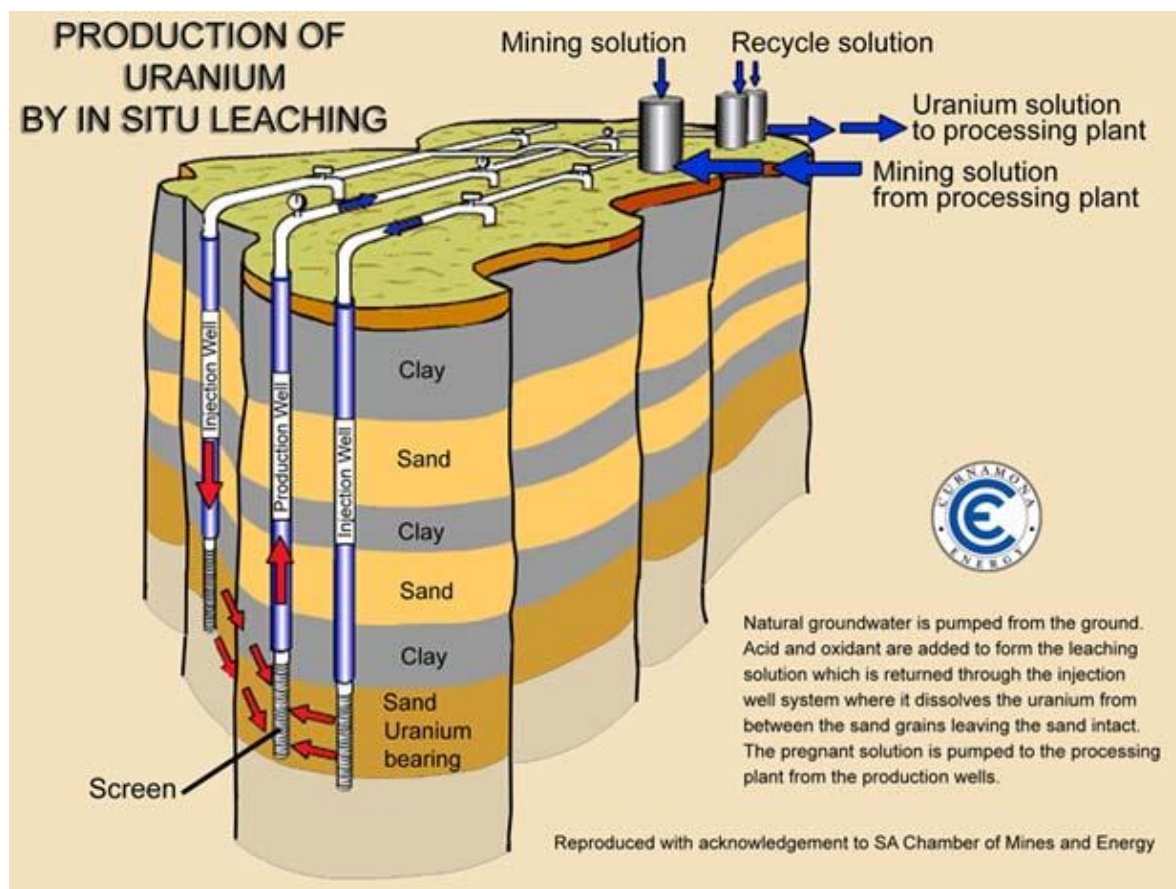
crpljenje vode, otkrivanje prisutnosti štetnih plinova i zaštita rudara, transport sirovine na površinu).





Zbog problematike podzemnog rada razvijena je metoda podzemnog ispiranja. Kod ove metode ruda ostaje u ležištu i mehanički se ne tretira, već se koristi sustav bušotina za upumpavanje oksidacijskog otapala u ležište minerala i sustav crpilišta. Otopina polako prolazi podzemnim ležištem, rastvara minerale i crpi se iz ležišta prema postrojenju za preradu. Kao otapalo najčešće se koriste kiseline zbog učinkovitosti, dok se lužine koriste u ležištima u kojima postoje karbonatni minerali koji su topivi u kiselinama (vapnenac, dolomit, prirodni gips, sol). Ovakav način dobivanja urana zahtijeva vrlo malu površinu i ne zahtijeva uklanjanje jalovine, a može se koristiti i kod ležišta s niskom koncentracijom urana. Međutim, ležište mora biti protočno radi upumpavanja i ispušavanja otopine, a sustav bušotina i

crpilišta mora biti pravilno projektiran i izveden kako ne bi došlo do kontaminacije okolnih podzemnih voda.



Nakon usitnjavanja ruda se u postrojenju za preradu tretira kiselinom kako bi se izdvojio uran od ostalih minerala. Otopina kiseline bogate uranom dodatno se pročišćuje i iz nje se ekstrakcijom dobiva uranov koncentrat U_3O_8 , tzv. žuti kolač. Uranov koncentrat sprema se u posebne kontejnere težine oko 400 kg i transportira do postrojenja za konverziju.



Torij kao nuklearno gorivo

Torijev gorivni ciklus je nuklearni gorivni ciklus u kojem se upotrebljava prirodni izotop torija, Th-232, kao oplodni materijal. U reaktoru s torijem dolazi do transmutacije Th-232 u fisibilni izotop U-233 nakon uhvata neutrona i dva β^- raspada. Proizvedeni U-233 može izgarati in-situ ili se kemijski ekstrahira iz istrošenog goriva i onda služi za izgradnju svježih gorivnih elemenata. Torijev gorivni ciklus ima nekoliko prednosti u odnosu na uranijev:

- Veći udio torija u prirodi,
- Bolja fizička i nuklearna svojstva (talište ThO_2 je pri 3300 °C),
- Lakše sprečavanje širenja nuklearnog naoružanja,
- Manja proizvodnja plutonija i aktinida.

Rezerve torija, objavljene 2007, iznose 4.4 milijuna tona (ukupno poznate i procijenjene rezerve), međutim podaci isključuju podatke za veći dio zemalja. Četiri godine kasnije rezerve su procijenjene na 5.5 milijuna tona.

Th-232 nije fisibilan i njegova direktna upotreba u termičkim nuklearnim reaktorima i u tom smislu slična je kao i upotreba U-238 samo što upotrebom torija uхватom neutrona umjesto fisibilnog Pu-239 nastaje, također fisibilni, U-233. Dakle, upotreba torija bez nekog fisibilnog izotopa u reaktoru je nemoguća. Uloga torija je „proizvodnja“ fisibilnog izotopa U-233, a idealno bi bilo kada bi gorivo koje sadržava torij proizvelo više U-233 nego što je tokom izgaranja potrošeno. Ili, drugačije rečeno, faktor konverzije bi morao biti >1.0 pa tada govorimo o oplodnom reaktoru. Termički oplodni reaktor s torijem jedino je moguć upotrebom U-233 kao fisibilnog materijala, a nije moguć samo s uranovim gorivom. Korištenje torija u gorivu koje sadržava plutonij ili ostale transuranijske elemente povoljno je jer ne dolazi do stvaranja novog plutonija iz torija kao u slučaju prisustva uranija, gdje uхватom neutrona U-238 nastaju transuranijski elementi s dugim vremenom poluraspada. Uz to, potrošnja Pu, dobivenog ili recikliranjem istrošenog goriva ili iz rastavljenog nuklearnog oružja, približno dvostruko je veća kod goriva s torijem nego kod klasičnog U-Pu goriva.

Torij, u formi torij-oksida ThO_2 , nije pomiješan s fisibilnim izotopima već je oplodni dio, nazvan blanket, fizički odvojen od fisibilnog dijela zvanog jezgra. ThO_2 u odnosu na UO_2 ima bolju termičku vodljivost, više talište i niži koeficijent termičke ekspanzije. Uхватom neutrona U-233 prelazi u U-232 uz emisiju dva neutrona. U-232 raspada se α -raspadom, a neki izotopi u lancu emitiraju gama zrake visoke energije i na taj istrošeno gorivo s torijem posjeduje inherentnu sposobnost proliferacije.

Geografska raspodjela rezervi torija prikazana je u donjoj tablici.

Tablica Geografska raspodjela torija

Država	Zalihe /t	Udio u %
Indija	846,000	16
Turska	744,000	14
Brazil	606,000	11
Australija	521,000	10
USA	434,000	8
Egipat	380,000	7
Norveška	320,000	6
Venezuela	300,000	6
Kanada	172,000	3
Ruska Fed.	155,000	3
Južna Afrika	148,000	3
Kina	100,000	2
Grenland	86,000	2
Finska	60,000	1
Švedska	50,000	1
Kazahstan	50,000	1
Ostale zemlje	413,000	8
Svijet ukupno	5,385,000	