

Jedrski gorivni cikel

Luka Snoj

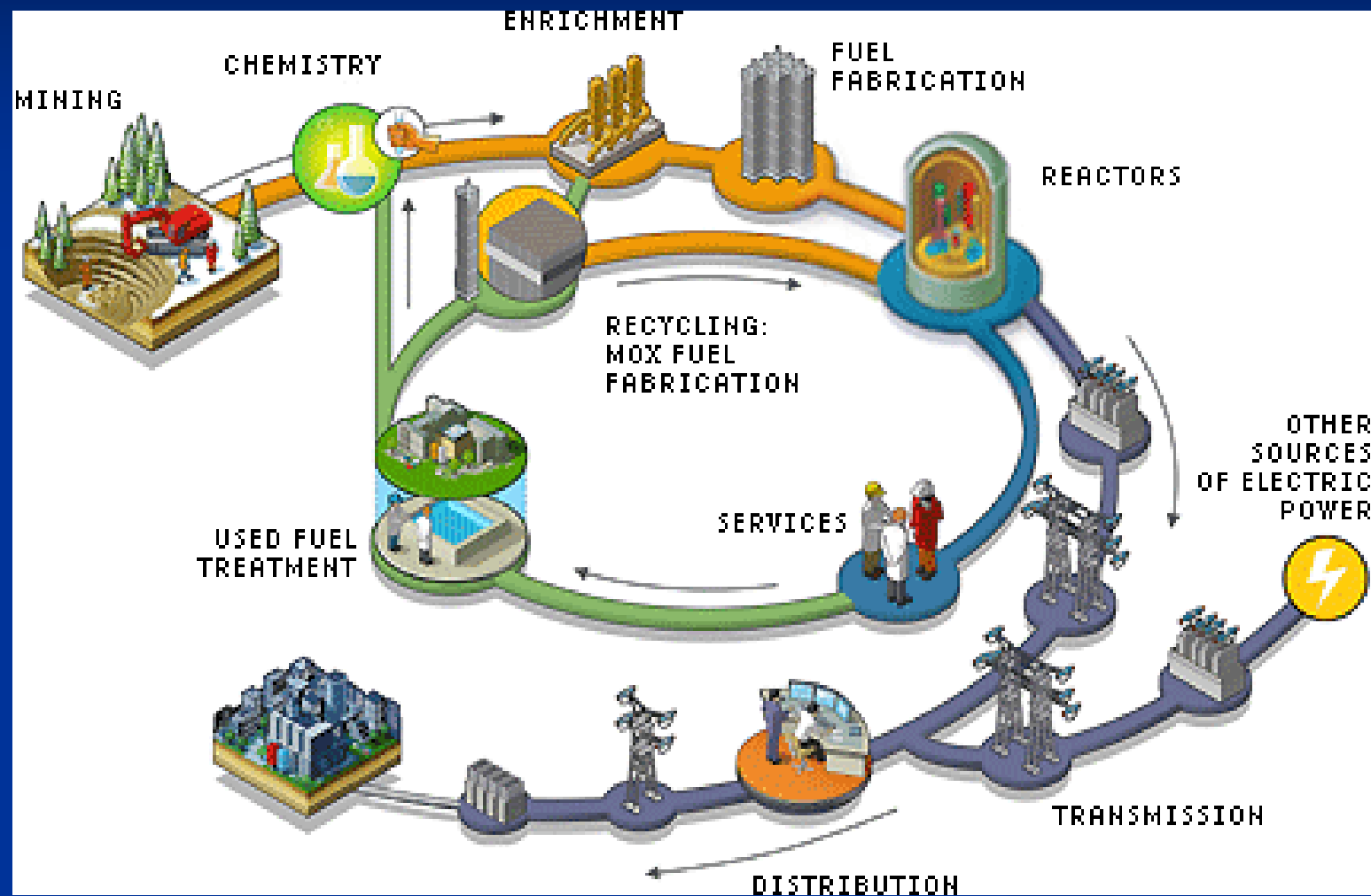
Odsek za reaktorsko fiziko
Institut Jožef Stefan

Pogoj za prikazovanje slik

Vsaka uporaba fotografij morajo biti spremljana s sledečimi besedami:

**Vzeto iz Arevinih arhivov
in
s spletnih strani ICJT**

Kratek pregled



Uran v naravi

oznaka: U

vrstno število : 92

gostota: 18.95 g/cm³

trije naravni radioaktivni izotopi:

izotop	delež v naravi (%)	razpolovni čas (leta)
²³⁸ U	99.27	4.47E9
²³⁵ U	0.72	7.13E8
²³⁴ U	0.0055	2.48E5

glavna nahajališča:

- povprečna koncentracija v zemeljski skorji (3g/t)
- v kislih kamninah (v povprečju 2-8g/t lahko pa tudi 20 in več, izjemoma več sto g/t)
- U⁶⁺ je dobro topen v vodi, se izpira z površja in nalaga v oceanih (0.003g/t)
- v mineralih kot uraninit (UO₂), uranov ruda (pitchblende) (U₃O₈), (USiO₄), (UTi₂O₄), ...



Uran - rudarjenje



Dnevni kop v Nigru, Arlit



Cigar lake, Saskatchewan, Kanada,
podzemno nahajališče



Dnevni kop v Franciji, Jouac (ne obratuje več)



Koncentriranje – od rude do rumene pogače

- drobljenje, mletje in oplemenitev rude
- ekstrahiranje urana iz rude (postopek močno odvisen od vrste rude) raztapljanje, ekstrahiranje iz raztopine, odtranjevanje nečistoč,.....
- končna oblika je uranov oksid (U_3O_8), rumene barve, ki da ime rumena pogača



Pretvorba - od rumene pogače do UF_6

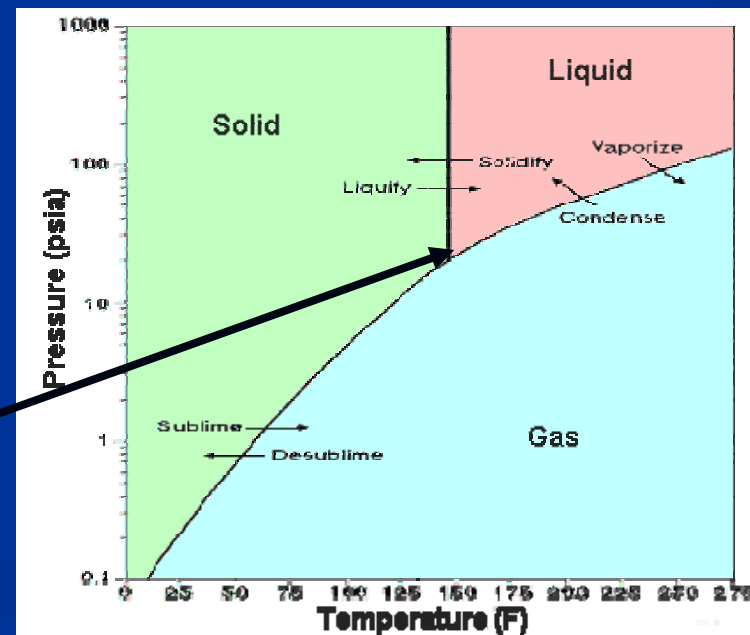
Zakaj pretvoriti uranov oksid v UF_6 ?

- Ločevanje ^{235}U od ^{238}U zahteva uran v plinasti obliki
- UF_6 je plin pri relativno nizki temperaturi in normalnem tlaku
- Fluor ima le en naravni izotop (^{19}F), zaradi česar je masna separacija urana ($^{235}\text{UF}_6$ od $^{238}\text{UF}_6$) lažja



trojna točka

(64 °C, 152 kPa)



Pretvorba- od rumene pogače do UF₆

rumena pogača (U₃O₈)

dušikova kislina

uranov nitrat UO₂(NO₃)₂

čiščenje
denitracija
redukcija

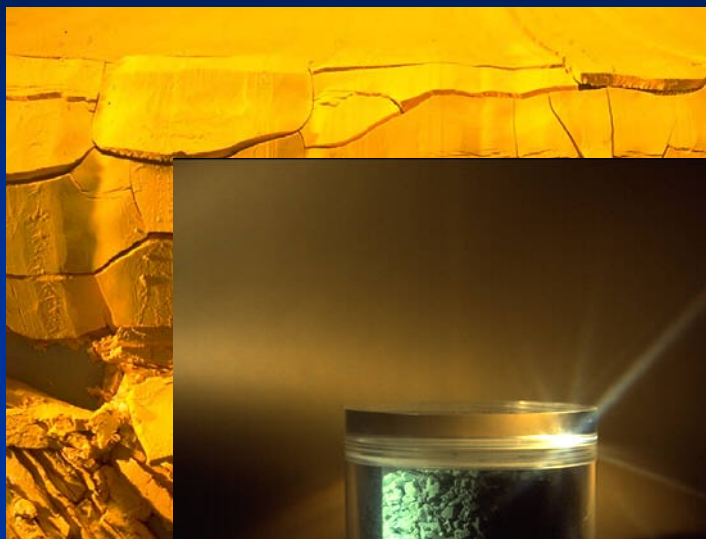
uranov dioksid (UO₂)



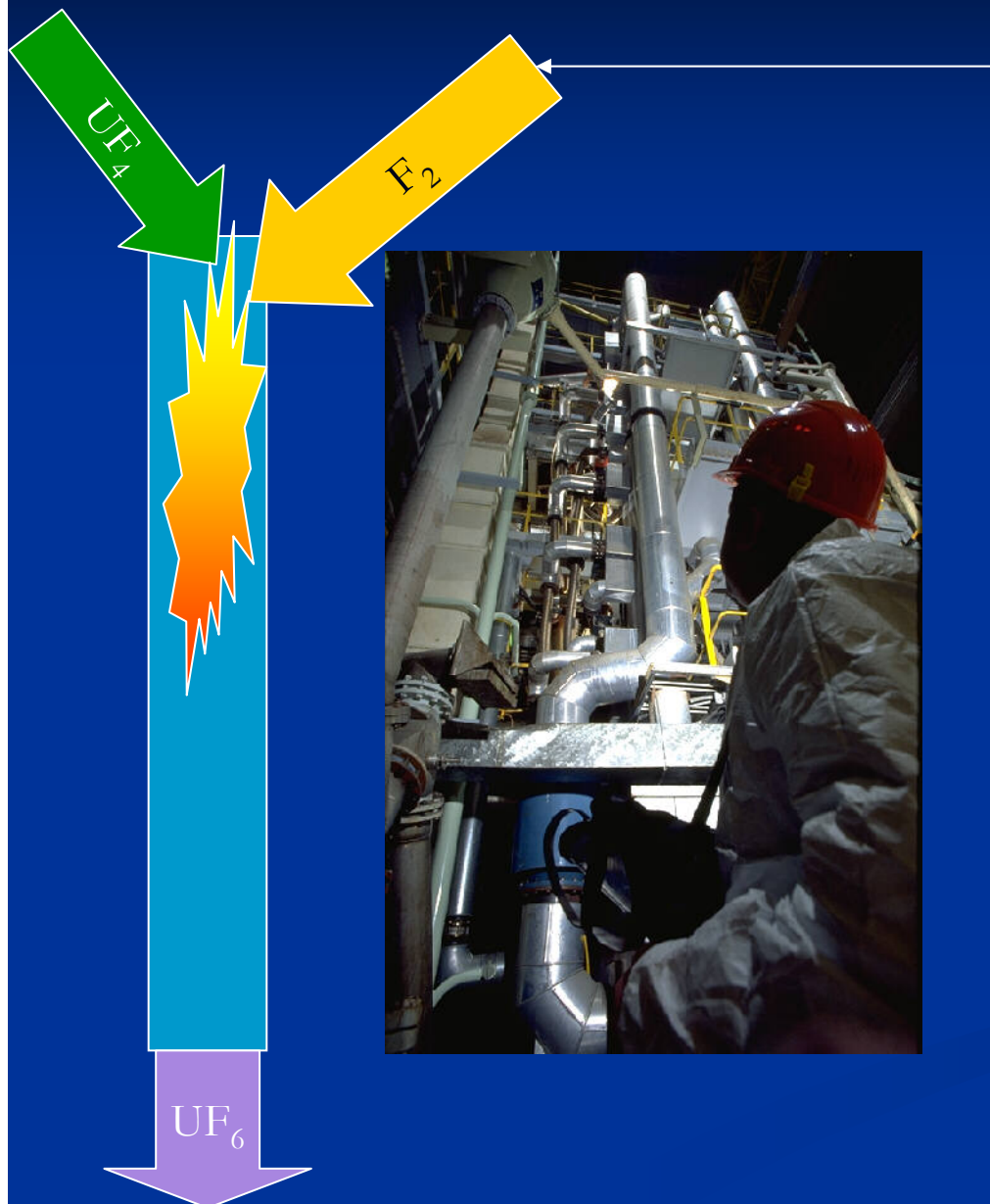
uranov tetrafluorid(UF₄)



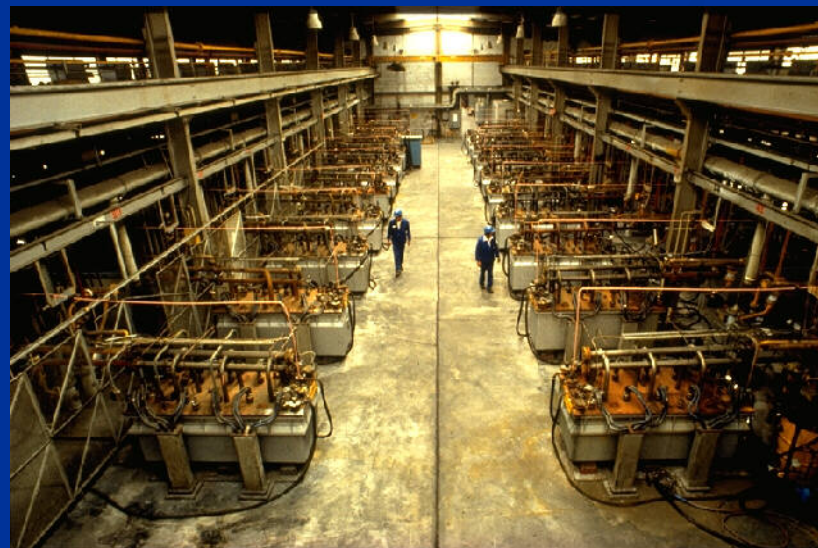
uranov heksafluorid (UF₆)



Proizvodnja F_2 in UF_6



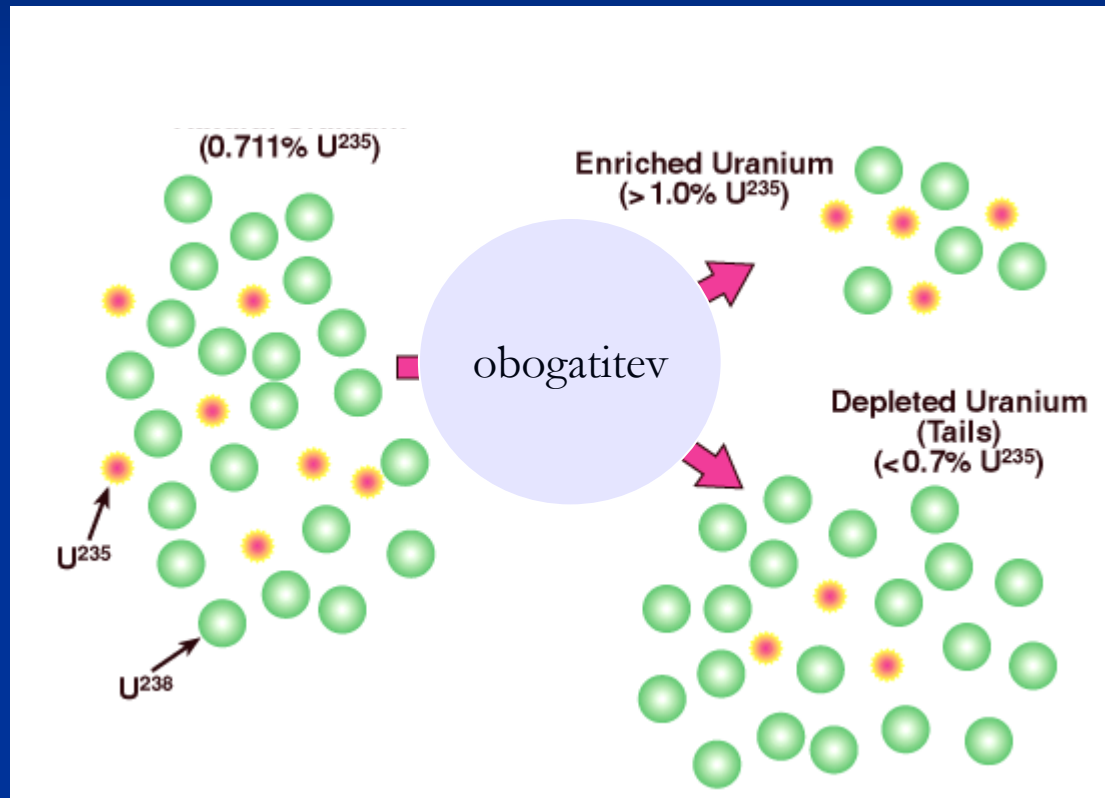
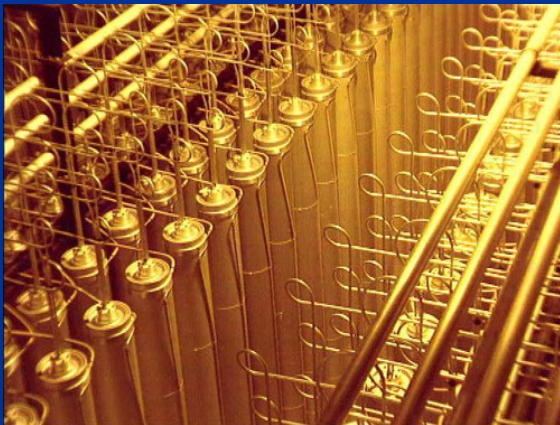
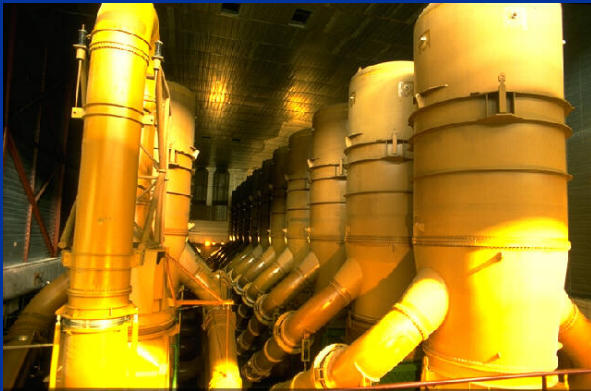
elektroliza fluorove kisline



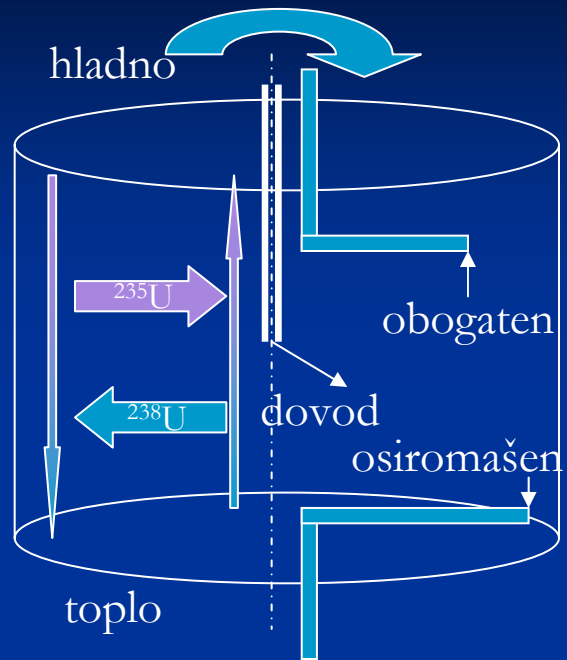
$U = 10 \text{ V}$, $I = 6000 \text{ A}$

Obogatitev

- plinska difuzija
- centrifuge



Obogatevanje – centrifuge



- radialna separacija - zaradi vrtenja
- aksialna separacija – gretje, konvekcija

Nekaj podatkov (red velikosti)

radij : ~ 10 cm

višina: ~ 0.5 m – 10 m

obodna hitrost: ~ 700 m/s

frekvenca vrtenja: $\sim 5 \cdot 10^3$ Hz

radialni pospešek: $\sim 10^6$ g

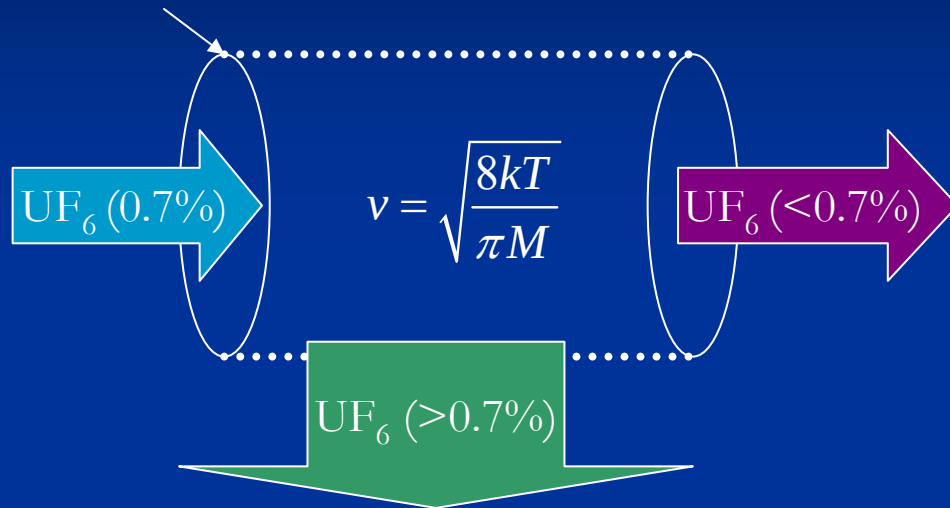
ločevalni faktor, α : ~ 1.3

zmogljivost: ~ 100 t U(4%) /leto



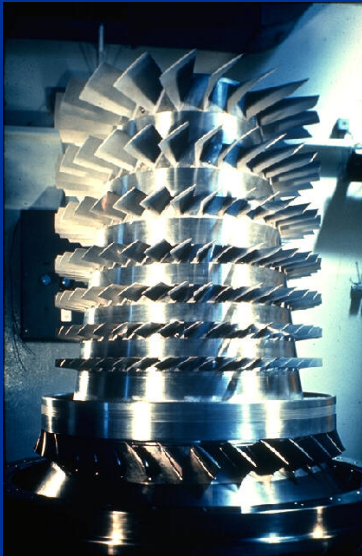
Obogatitev – plinska difuzija

porozna membrana (10^9 luknjic/cm²)

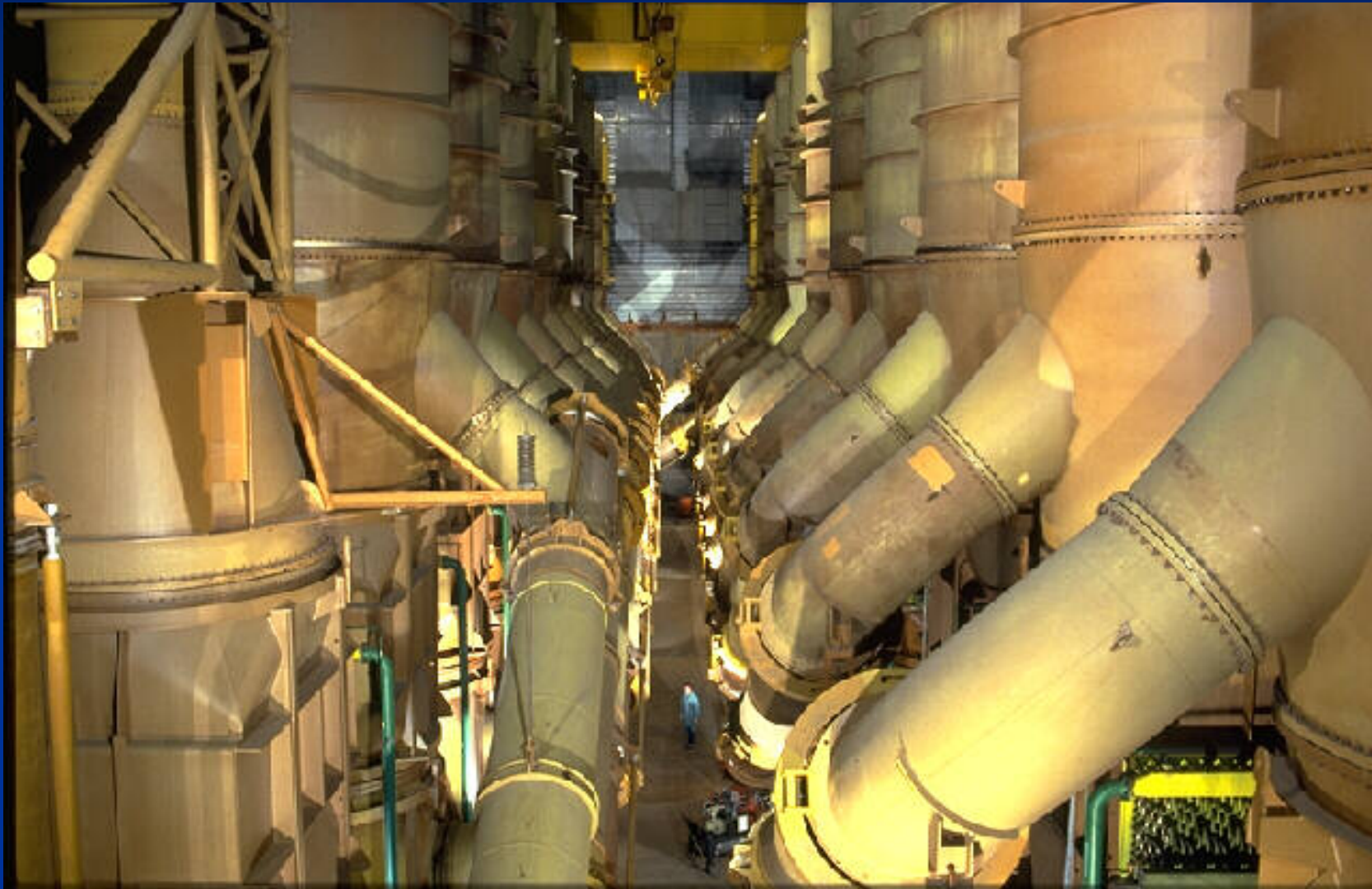


$$\alpha = 1.0043$$

~ 1400 stopenj za 3-4 % obogatitev



Obogatevanje – plinska difuzija



Obogatitev – plinska difuzija



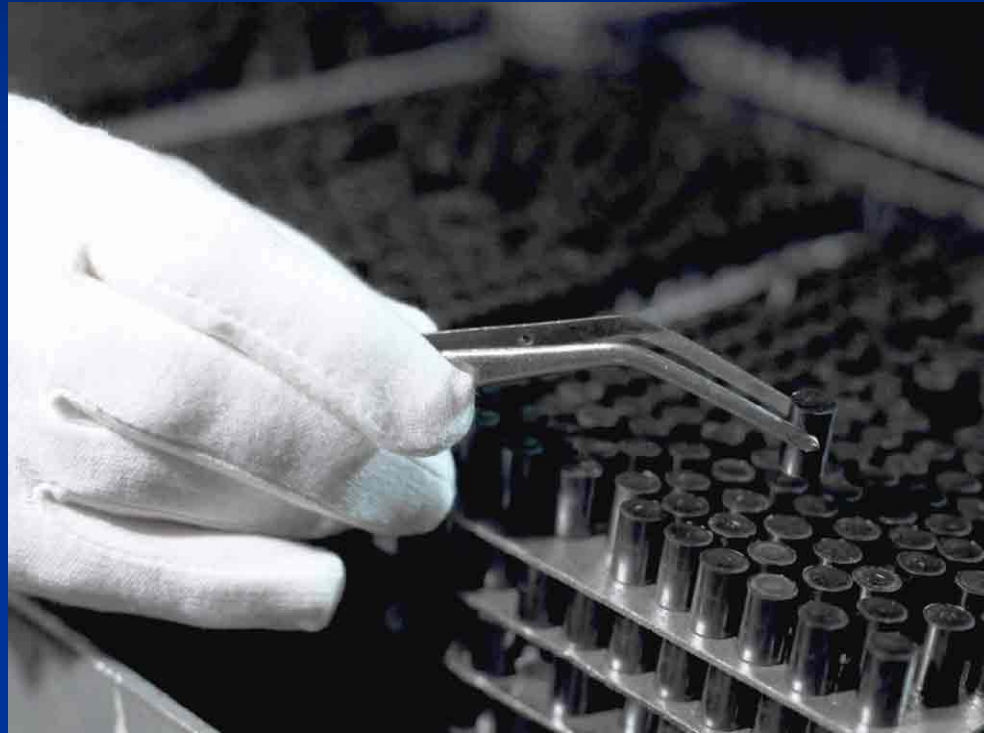
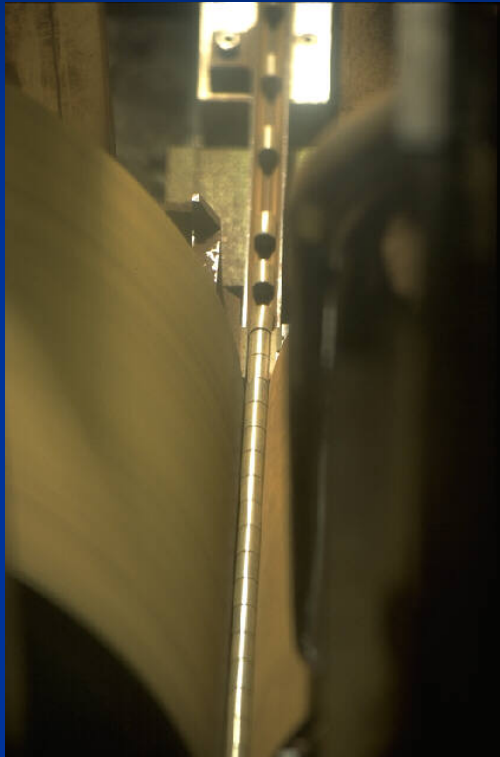
Gorivo

Obogateni UF_6 se nato defluorira s pomočjo kisika in predela v UO_2 , iz katerega se izdelujejo t.i. uranove tabletki

Vrste goriv:

- naravni uran (samo težkovodni in grafitno moderirani reaktorji)
- obogateni uran UO_2 ($\sim 96\%$ ^{238}U , $\sim 4\%$ ^{235}U)
- MOX gorivo - mešanica oksidov ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$)
- obogateni reprocesirani uran UO_2 (poleg ^{238}U in ^{235}U imamo še ^{234}U in ^{236}U ter ^{232}U)

Gorivo – uranove tabletke



Gorivo – gorivne palice

Uranove tabletko nato vložijo v gorivno palico, dodajo vzmet.

Nato pa palico zaprejo s pokrovčkom in zavarijo.

Predenjo palico vstavijo v gorivni element jo še enkrat natančno pregledajo ter preverijo obogatitev goriva.

Obogatitev preverjajo z izvorom nevtronov, in sicer, s kalifornijem, ki se spontano cepi in oddaja nevtrone.

Nastali nevtroni aktivirajo ^{235}U , ki nato oddaja karakteristične promptne gama žarke.

Na podlagi podatkov o intenziteti izvora in intenziteti nastalih gama žarkov, lahko zelo natančno določijo obogatitev.

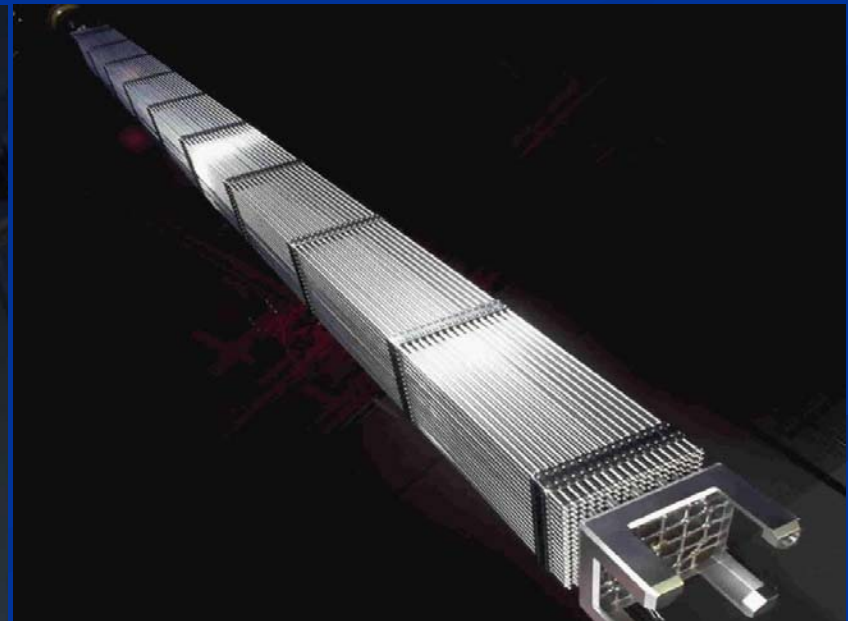
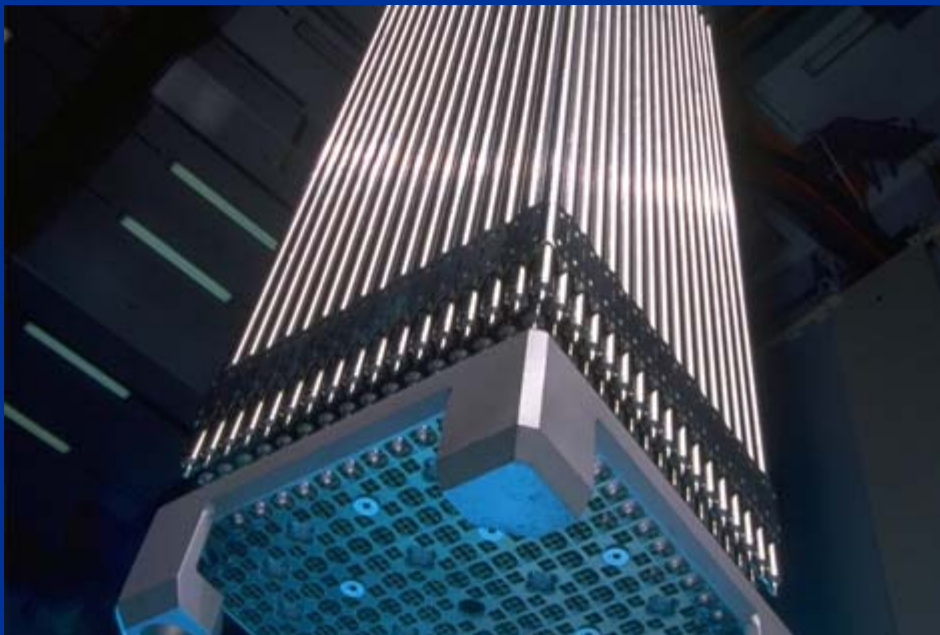
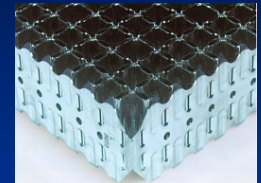
Gorivo – gorivne palice



Gorivo – gorivni element

Gorivni element sestavljajo:

- zgornja in spodnja šoba (identifikacija gorivnega elementa, transport g.e., usmerjanje hladila, stabilizira in nosi gorivne palice)
- gorivne palice (odvisno od izvedbe; 14x14, 15x15, 16x16, 17x17, 18x18)
- distančne mreže (spacer grid), ki preprečujejo medsebojno dotikanje palic
- mešalne mreže (skrbijo za mešanje hladila ob gorivnih palicah)
- prazna mesta za kontrolne palice in gorljive absorberje

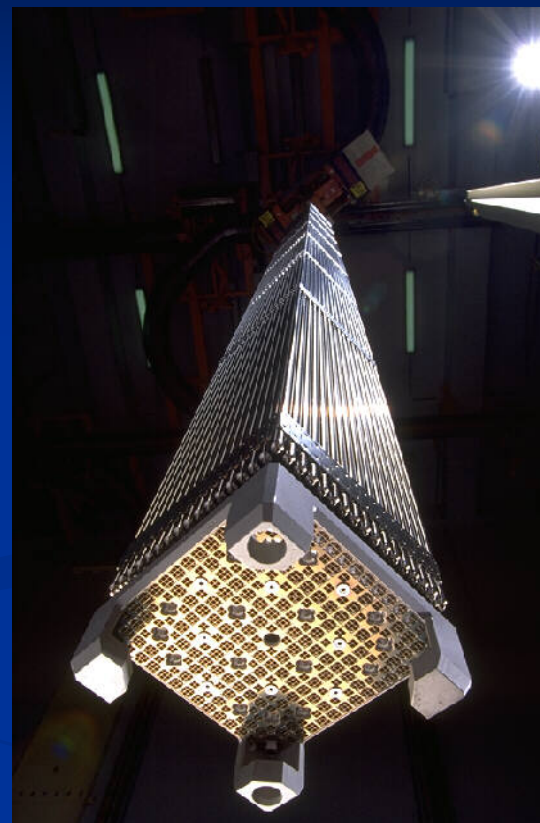
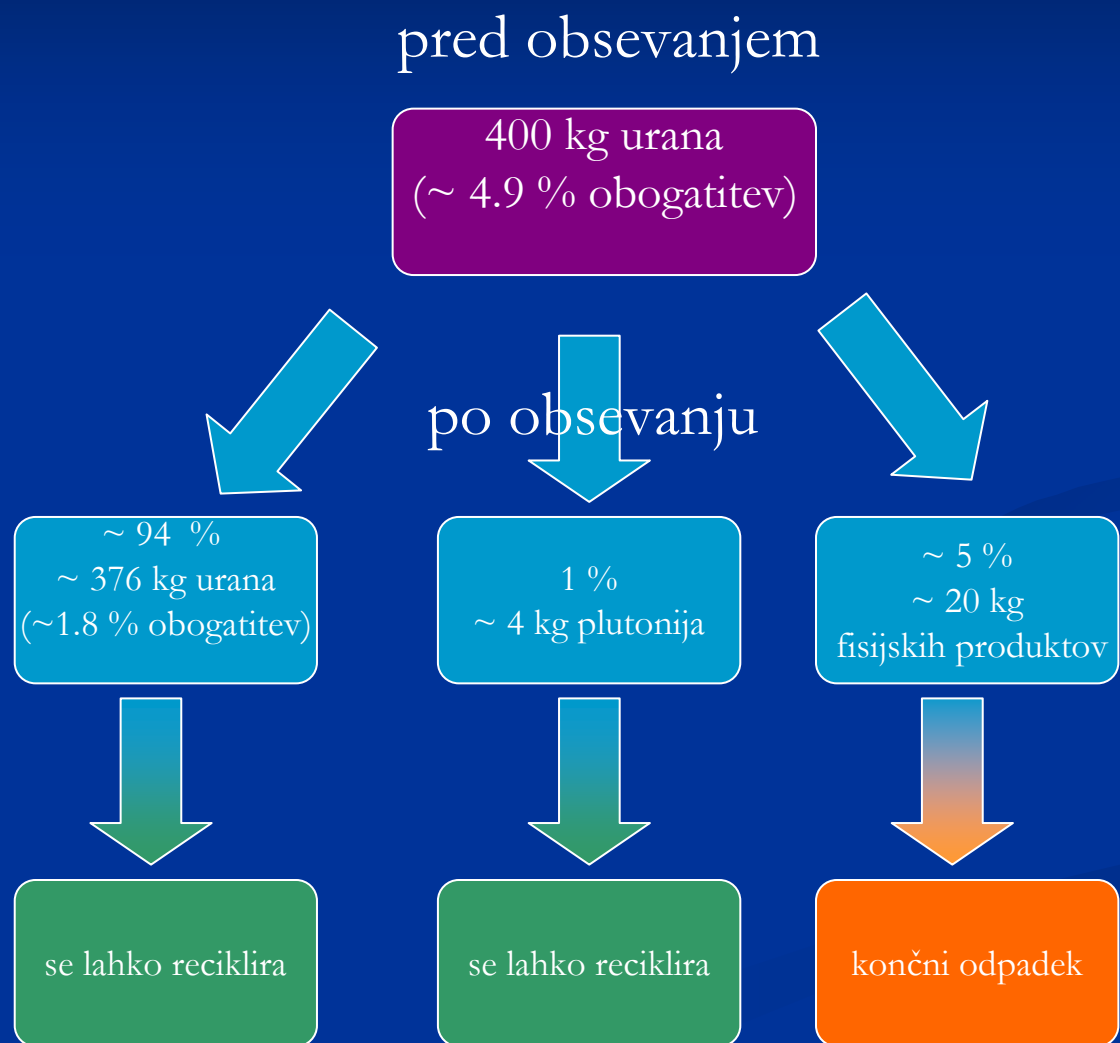


Izgorevanje

- Gorivni elementi so v sredici
- Poteka neprestana verižna reakcija
- Jedra ^{235}U se cepijo
- Nastajajo fisijski produkti (plinasti in trdni)
- Nastaja Pu
- Ob ustavitvi se približno ena tretjina gorivnih elementov zamenja
- Ko dosežemo določeno izgorelost ($\sim 40000 \text{ MWd/t}$), element odstranimo

Kaj z izrabljenim gorivom ?

Izrabljeno gorivo - sestava

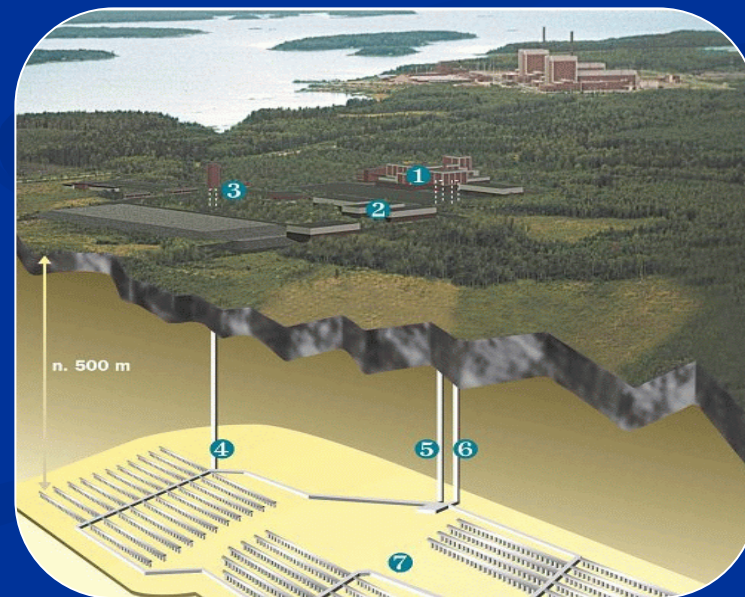


Kaj z izrabljenim gorivom ?

izrabljeno gorivo

reprocesiranje

končno odlaganje

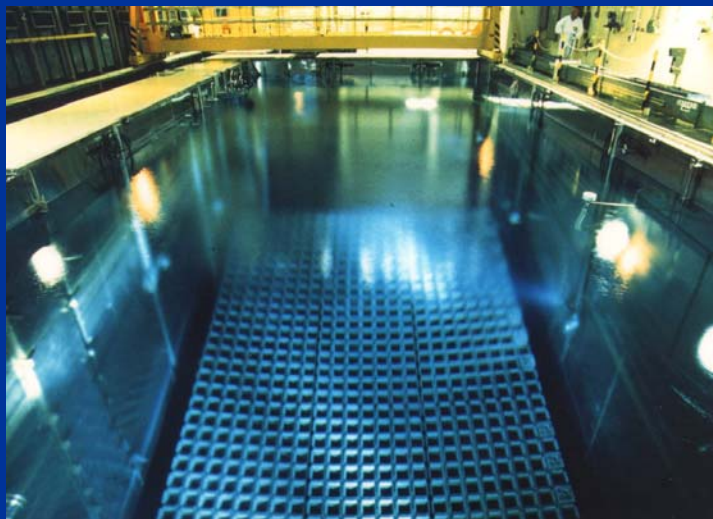


Izrabljeno gorivo

Takoj po odstranitvi gorivnih elementov iz sredice, se morajo le-ti najprej nekaj let (najmanj ~ 2 leti) hladiti v bazenu za izrabljeno gorivo tik ob jedrski elektrarni.

- reprocesiranje goriva
po dveh do treh letih hlajenja ga že lahko prepeljemo v tovarno za reprocesiranje.
- V nasprotnem primeru lahko gorivo v bazenu za iztrošeno gorivo “čaka na boljše čase” ☺

Po nekaj letih je možno suho skladiščenje, v zračno hlajenih zabojnikih



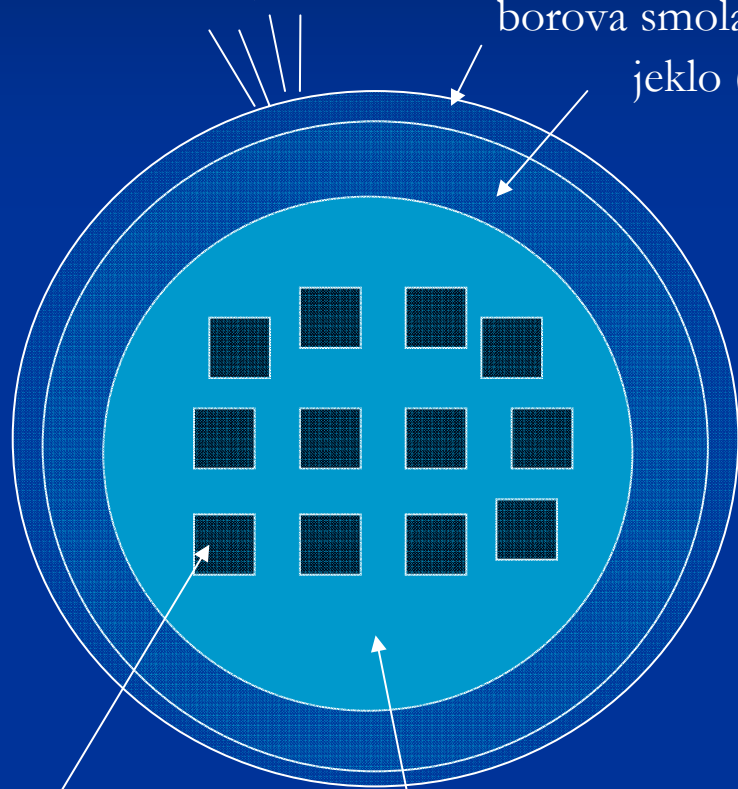
Prevoz izrabljenega goriva

masa zabojnika
~ 100 ton

hladilna "rebra" (80°C)

borova smola (10 cm)

jeklo (30 cm)



gorivni elementi (12 el,
15 ton) 60 kW, 300 °C

aluminij in bor



Zabojnik - nesreče

zabojnik mora prestat:

- padec z višine 9 m
- padec z višine 1 m na špičast predmet – palico
- požar (800°C, 30 min)
- potopitev v vodo (8 h tesnenje na 15 m)



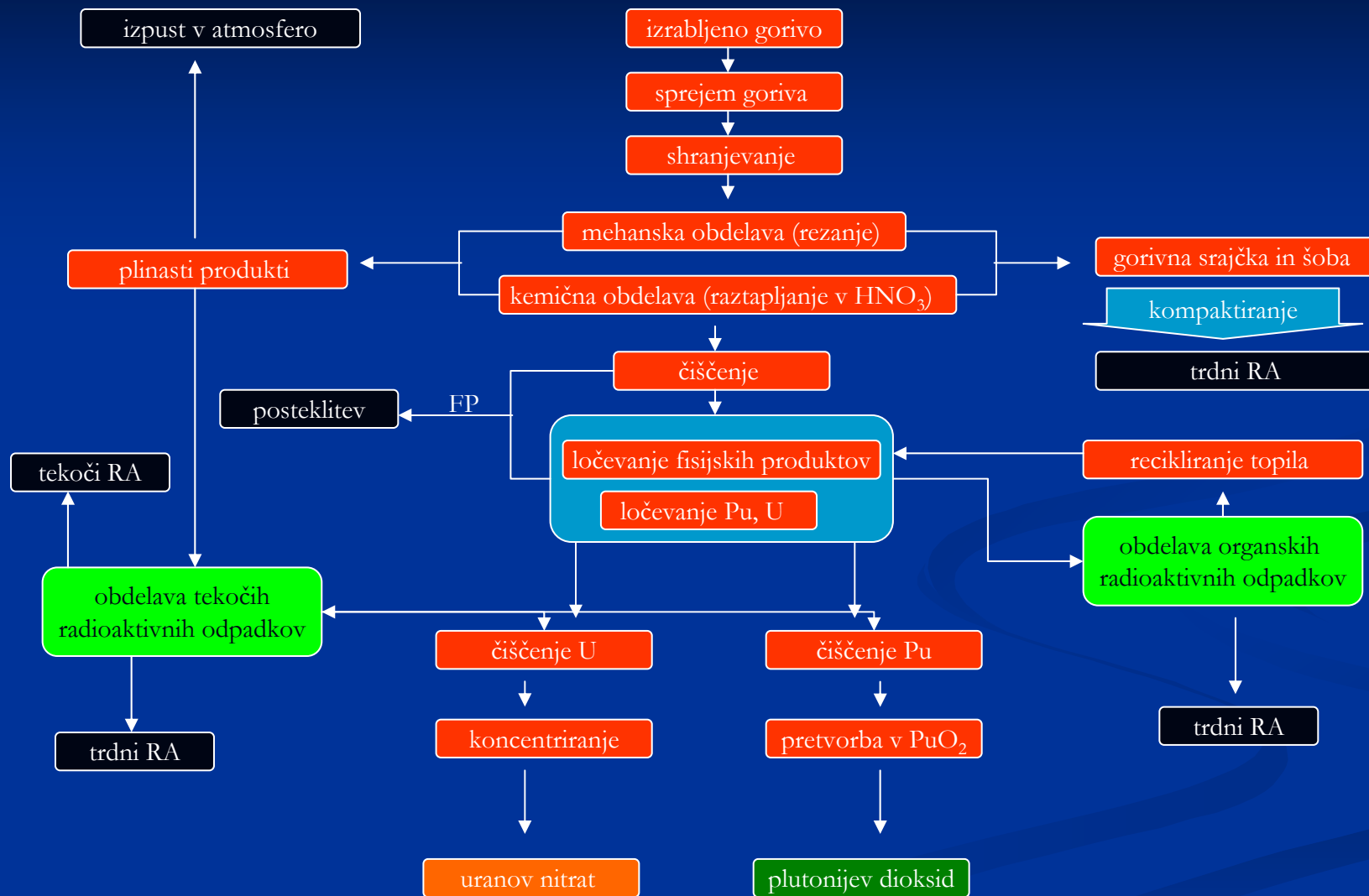
Transport goriva



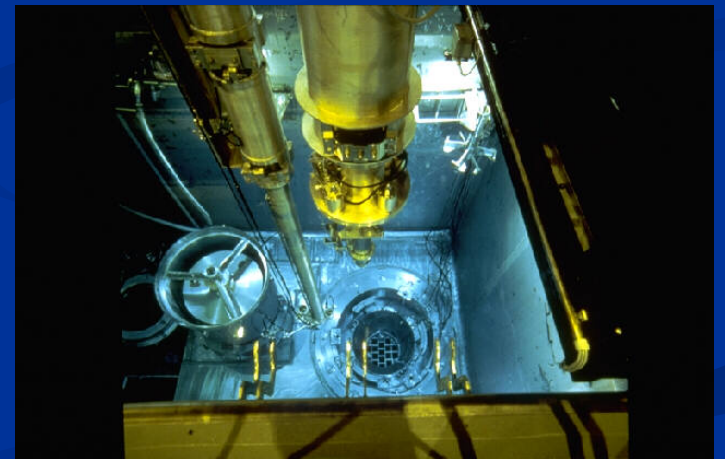
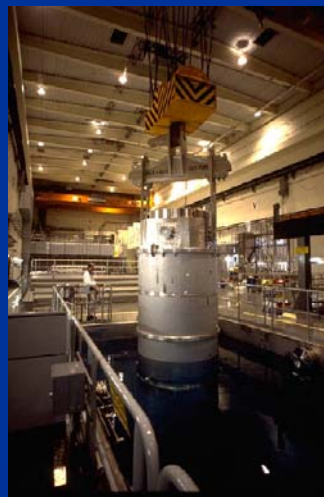
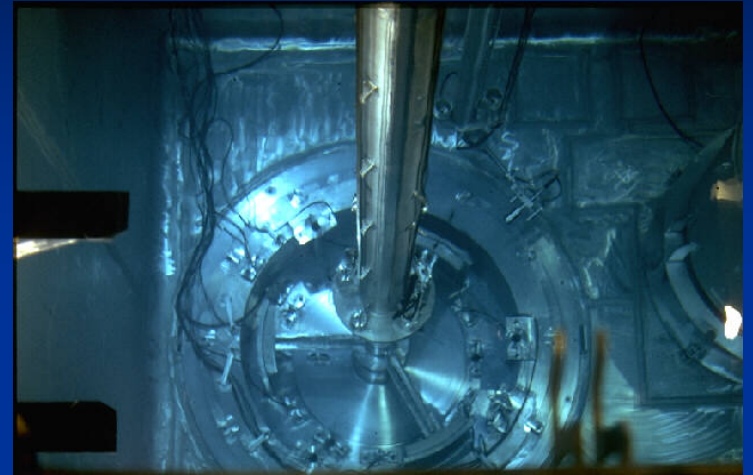
La Hague, Francija



Reprocesiranje



Sprejem goriva

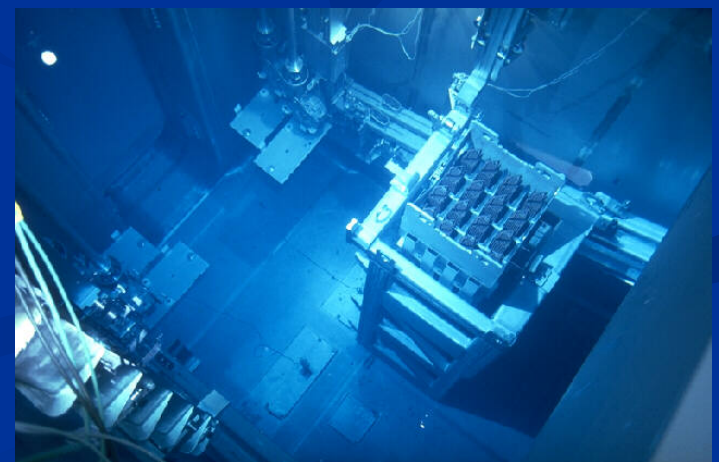
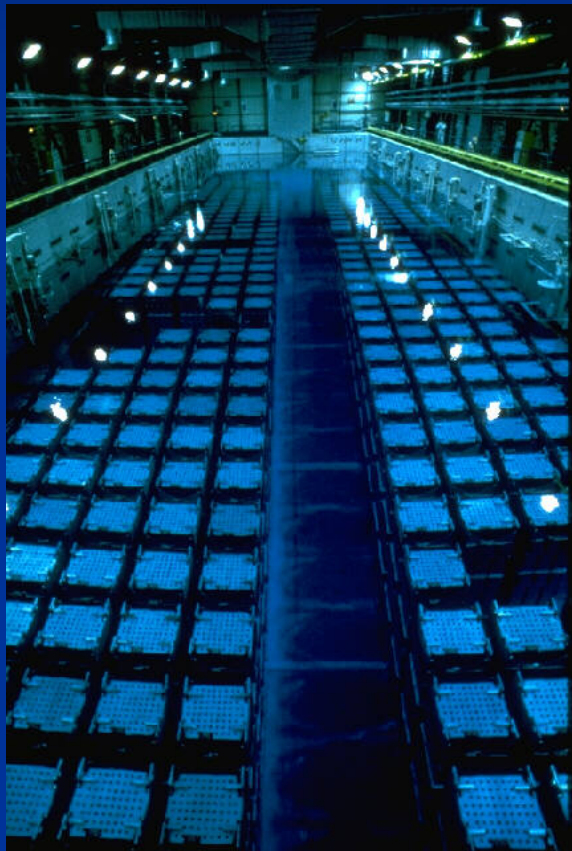


raztovarjanje je lahko:

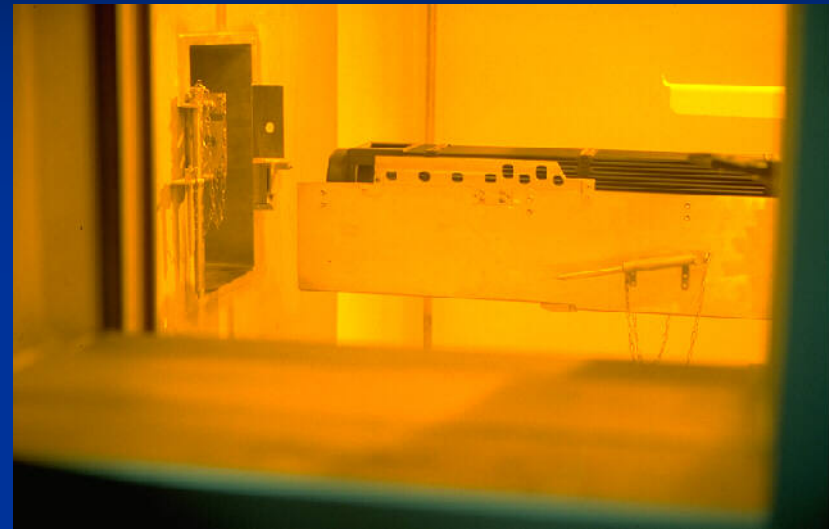
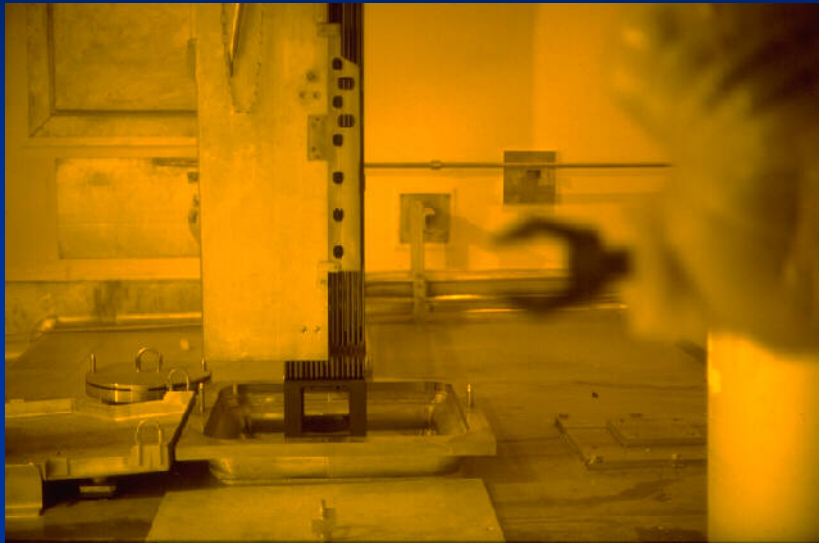
- suho
- mokro

Shranjevanje

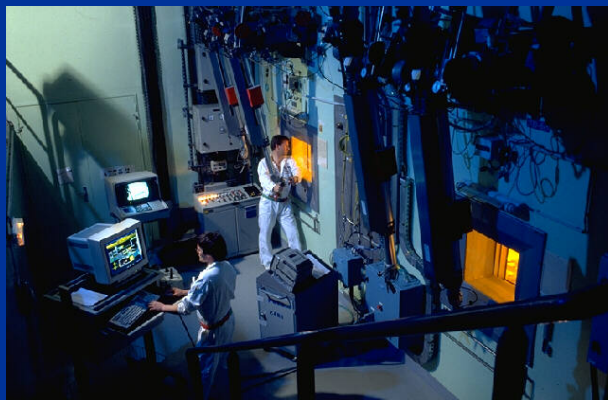
Po raztovarjanju se izrabljeni gorivni elementi še približno 3 leta hladijo v bazenu



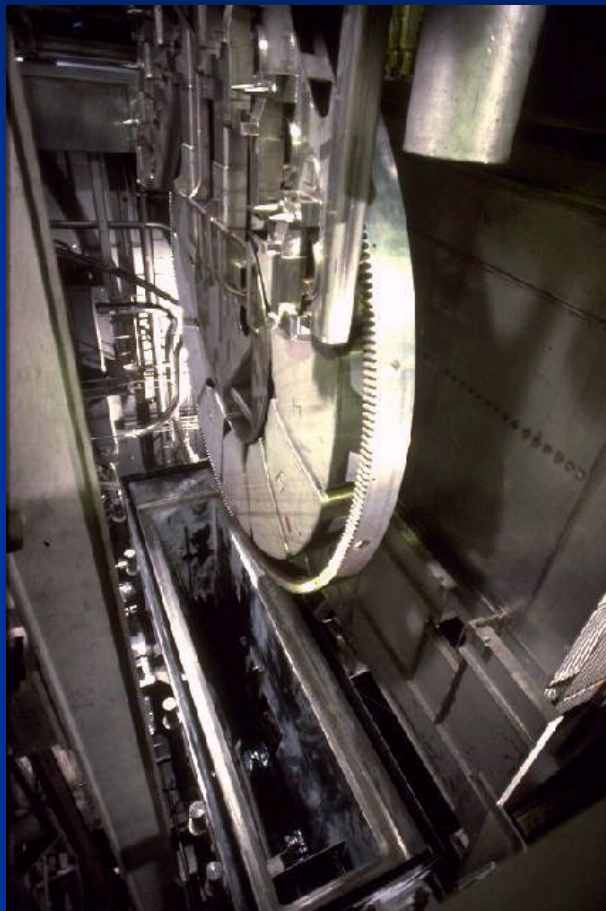
Mehanska obdelava - rezanje



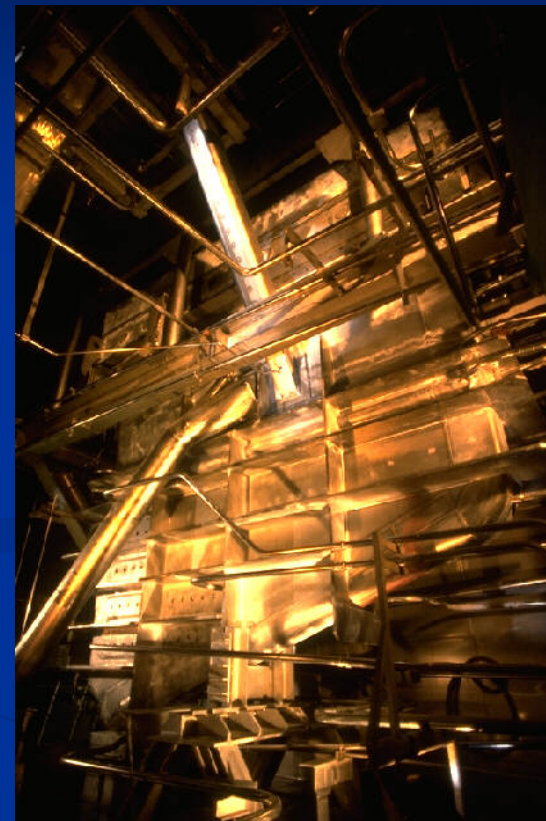
gorivni element (razen šob)
razrežejo na nekaj cm dolge koščke



Kemična obdelava - raztapljanje



majhne koščke gorivnega elementa kontinuirano raztapljajo v rotirajočem se raztopljevalcu. gorivo in fisijski produkti se raztopijo, cirkonijeva srajčka in šobe pa ostanejo cele in jih nato mehansko ločijo



Kemijski procesi

Ločevanje fisijkih produktov, urana in plutonija, ločevanje topil, prečiščevanje, koncentriranje pretvorba v oksid oz. nitrat potekajo preko zapletenih kemijskih procesov.



Kompaktiranje

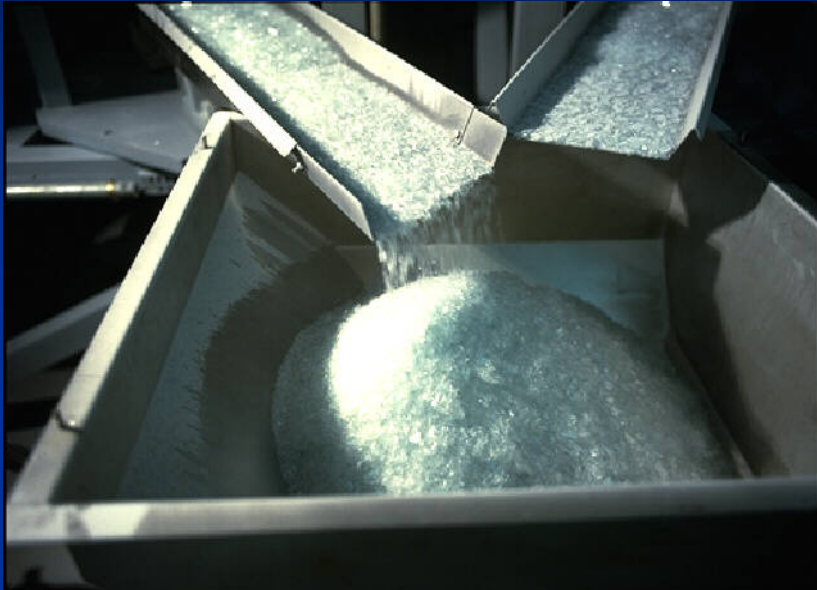


Srajčko gorivnega
elementa in šobe
mehansko stisnejo, da
zmanjšajo volumen

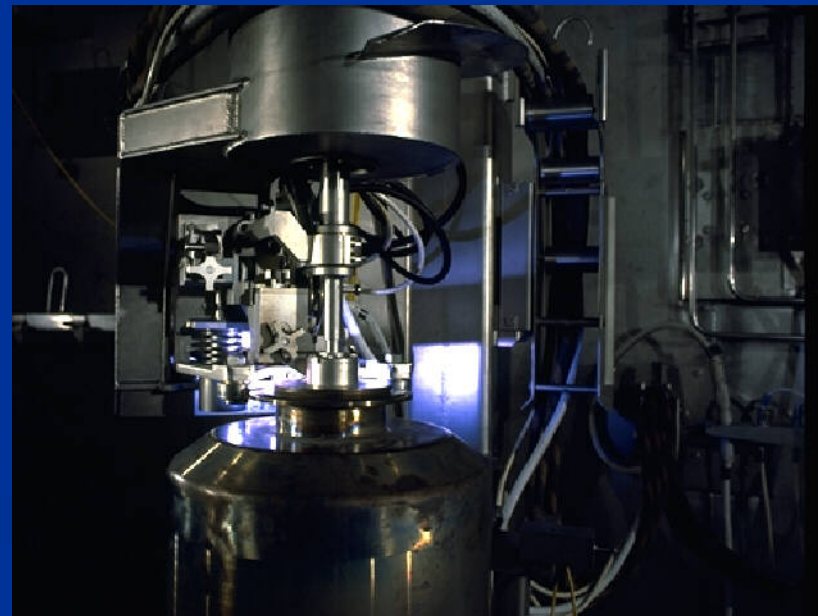


stiskanje poteka s silo ekvivalentno teži 2500 ton
pod stiskalnico je približno 20 m betona

Posteklitev



82 % stekla
18 % fizijskih produktov



Shranjevanje steklenih odpadkov



Dolgoročne možnosti za RAO-transmutacija

Najpomembnejši dolgoživi radiotoksični izotopi v izrabljenem gorivu so manjši aktinidi (minor actinides): americij (Am), neptunij (Np), kirij (Cm)

- Najlažje jih uničimo s transmutacijo, t.j. obsevamo jih z nevtroni, pri čemer pazimo, da se nevtroni ne absorbirajo (smo na istem), ampak povzročijo fisijo teh jeder.
- Za tak proces so najprimernejši nevtroni v hitrem reaktorju.
- Raziskave na tem področju še potekajo

Dolgoročne možnosti za RAO- podzemno skladišče

Intenzivne raziskave potekajo o možnostih za odlaganje VRAO v podzemna skladišča. Le ta bi bila zgrajena ~ 500 m pod površjem zemlje v stabilnih in vodonepropustnih geoloških podlagah.

Raziskave potekajo na različnih področjih:

- difuzija radioaktivnih snovi skozi različne kamnine in materiale
- obstojnost materialov
- embalaža za odpadke
- pasivno hlajenje
- načine sporočanja informacij zanamcem o vrsti odpadkov (medij, jezik,..)

Reprocesiran uran - lastnosti

Poleg ^{235}U in ^{238}U vsebuje (v manjših količinah) še:

- ^{232}U (nima vpliva na reaktivnost, njegovi potomci so gama sevalci, zaradi česar je potrebno pazljivo ravnanje in zaščita)
- ^{234}U alfa sevalec, absorber nevtronov (potrebna je višja obogatitev)
- ^{236}U absorber nevtronov (potrebna je višja obogatitev)

Pri uporabi reprocesiranega urana je potrebna malce večja obogatitev za doseg enake reaktivnosti kot z naravnim uranom.

MOX gorivo

- mešanica PuO_2 in UO_2
- Pu nadomešča ^{235}U
- standardna mešanica vsebuje $\sim 8\%$ Pu ($\sim 65\%$ ^{239}Pu) in $\sim 92\%$ osiromašenega U
- MOX gorivo ima iste dimenzije in drugačno materialsko sestavo kot običajno gorivo
- Proizvodnja je podobna kot pri klasičnem gorivu, le da zahteva več radiološke zaščite

Zaključek

- gorivni cikel ponuja ogromno različnih možnosti (transmutacija, reprocesiranje, skladiščenje, MOX, centrifuge, lasersko obogatevanje, ...)
- potek gorivnega cikla določata ekonomija in politika

Hvala za pozornost !