

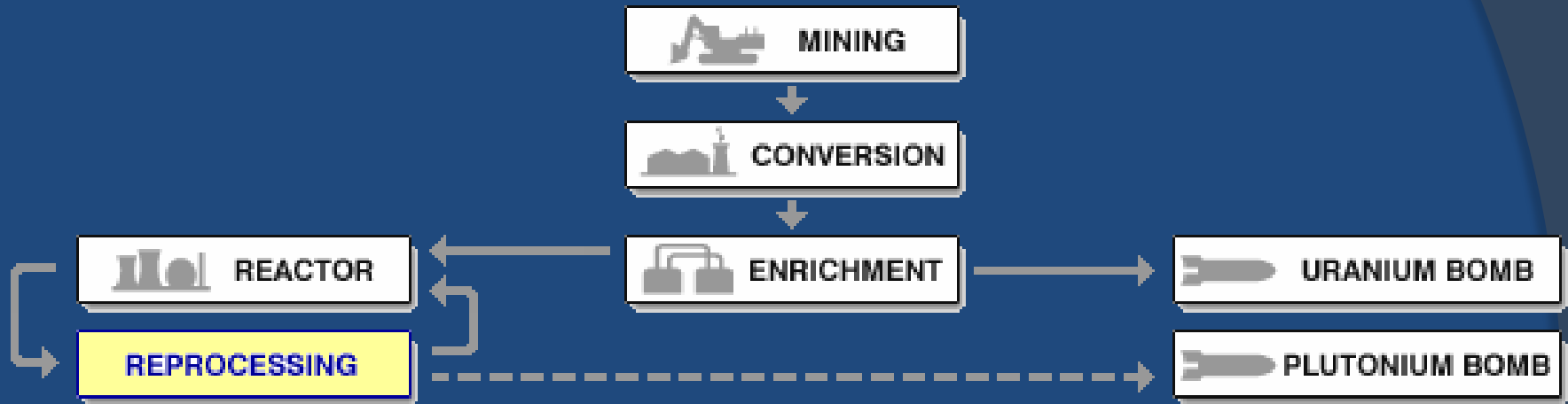
REPROCESIRANJE RABLJENEGA JEDRSKEGA GORIVA



Avtor: Anej Štiglic

Mentor: prof. dr. Iztok Tiselj

Reprocesiranje

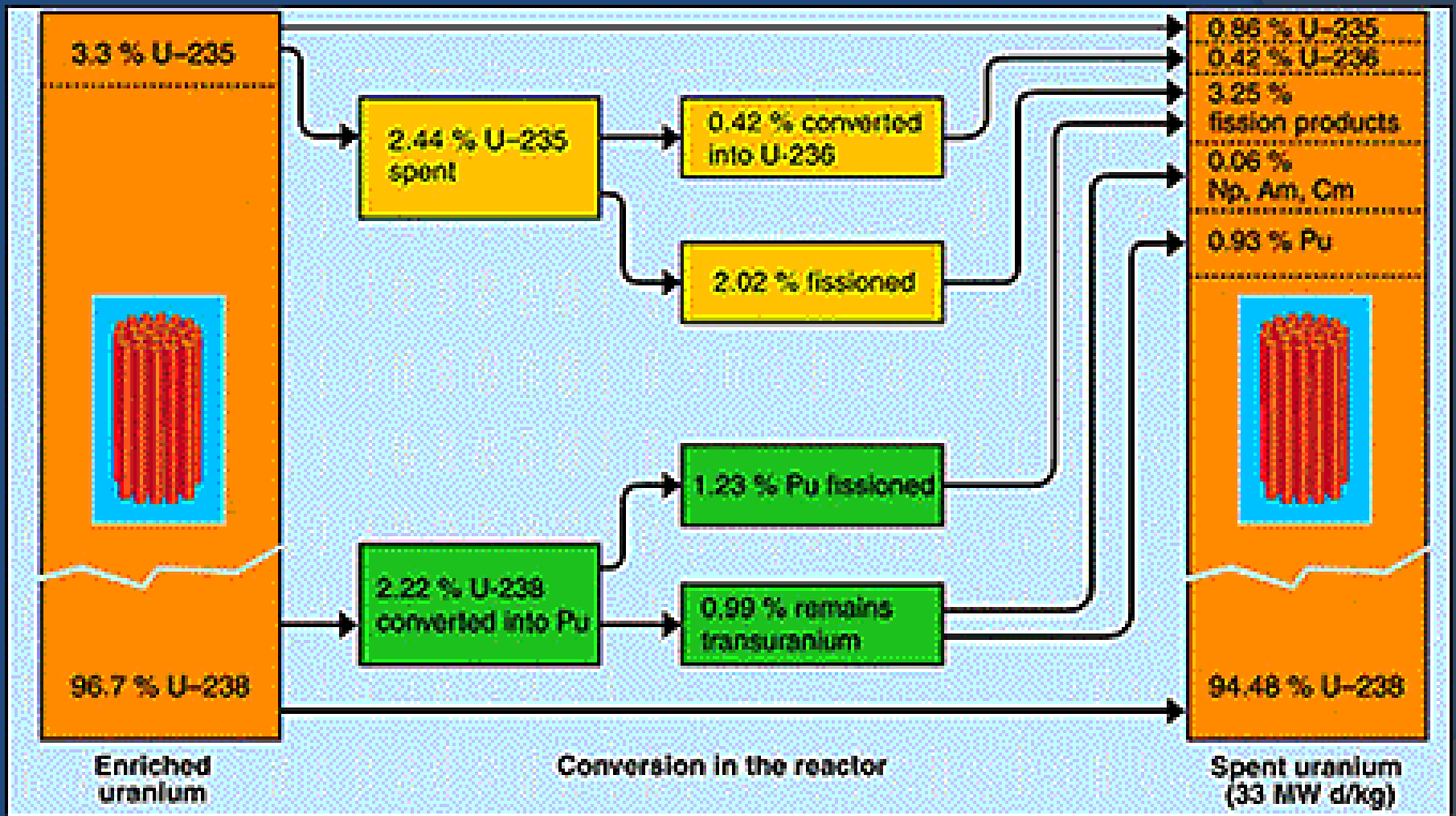


- Odstranitev fisijskih produktov in transuranskih el.
- Predelava rabljenega goriva
 - Izluščimo cepljive in oplodljive materiale
 - Manjši volumen VRO, na 20% začetnega
- Obnovitev U in Pu, 25 – 30% dodatne energije

- ⊙ Zadnjih 10 let tudi: dolgoživi aktinidi, Pu
 - Končajo kot fisijski produkti (hitri reaktorji)
 - Znižamo dolgotrajno radioaktivnost VRO
 - Preprečimo zlorabo plutonija

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- ⊙ Uporabni del goriva:
 - 96% U (0,5 – 1% U235), 1% Pu
 - U in Pu reciklirana kot sveže gorivo
 - Prihranimo 30% naravnega urana
- ⊙ Ostalo: stabilni FP (3%), Cs in Sr (0,3%), I, Tc, dolgoživi FP, Am, Cm, Np (0,3%)



○ Sveže gorivo (levo), rabljeno (desno)

- Potencial rabljenega goriva: 100GWe za 30 let
- 90 000t / 290 000t reprocesiranega
- Letno okoli 4000t (od oktobra 2013)

Reprocesiranje po svetu (t / leto), postopek PUREX			
Gorivo LWR	Francija, La Hague	1700	
	VB, Sellafield (THORP)	900	
	Rusija, Ozersk (Mayak)	400	
	Japonska (Rokkasho)	800*	
	SKUPNO LWR		3800
Druga jedrska goriva	VB, Sellafield (Magnox)	1500	
	Indija (PHWR, 4 obrati)	330	
	SKUPNO OSTALA		1830
Vsota vseh			5630

Produkti reprocesiranja

1. Reprocesiran U

IZOTOP	DELEŽ	LASTNOSTI
U-238	99%	oplodljiv
U-237	0,001%	razpolovni čas 1 teden (beta)
U-236	0,4 – 0,6%	absorber n (ni cepljiv, ne oplodljiv)
U-235	0,4 – 0,6%	cepljiv
U-234	< 0,020%	iz rude, oplodljiv
U-233	v sledih	cepljiv
U-232	v sledih	absorbira n, potem cepljiv razpade v gama sevalce

◎ 2. Plutonij

- Izotopi odvisni od izrabljenosti goriva
- Večja izrabljenost, več necepljivih izotopov in aktinidov, manj Pu
- Necepljivi izotopi, aktinidi
- Uporaba za gorivo MOX (200 t/leto)



◎ Sellafield (Anglija), reprocesiranje

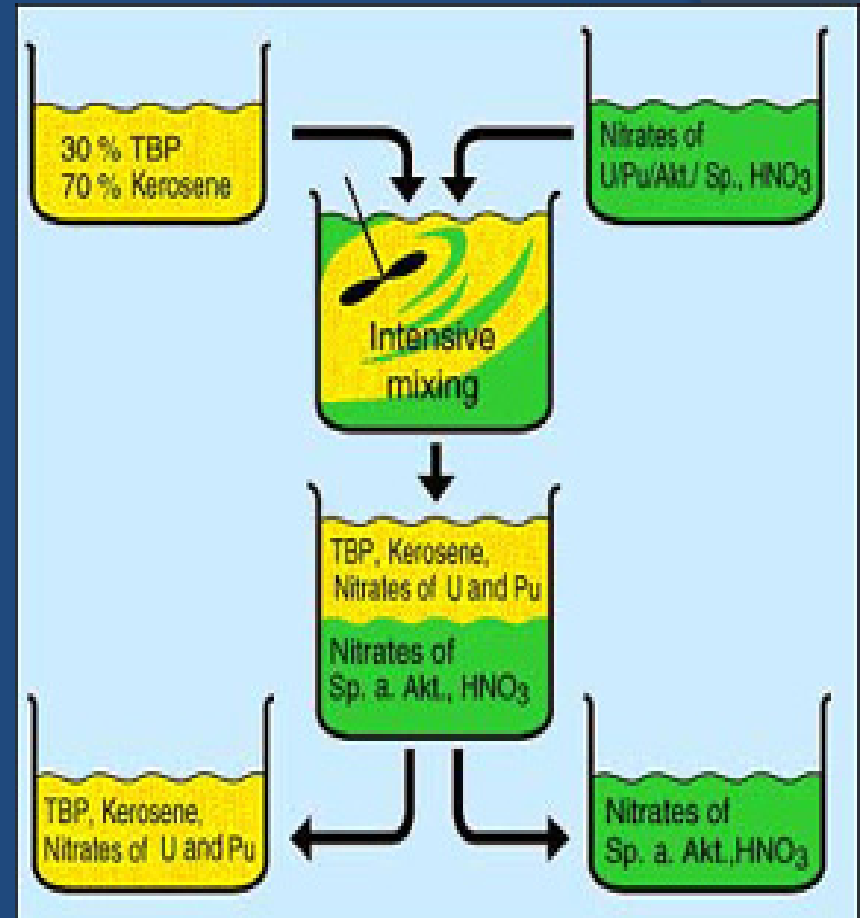
Možnosti reprocesiranja

- ⦿ U, Pu (danes)
- ⦿ U, Pu + malo U
- ⦿ U, Pu, aktinidi
- ⦿ U, Pu + Np, Am + Cm
- ⦿ U + Pu
- ⦿ U, Pu + aktinidi, fisijski produkti

RepU se obogati, Pu v gorivo MOX, aktinidi so neuničljivi.

PUREX

- Danes v uporabi povsod
- Pu – U extraction
 - Dobimo kovine z oksidacijskim št. +4 in +6
 - Raztapljanje v dušikovi kislini
 - 20 – 40% tributil fosfat (TBP) v ogljikovodikovem topilu (kerozin, dodekan)
 - Kerozinska raztopina
 - $\text{UO}_2 (\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}$



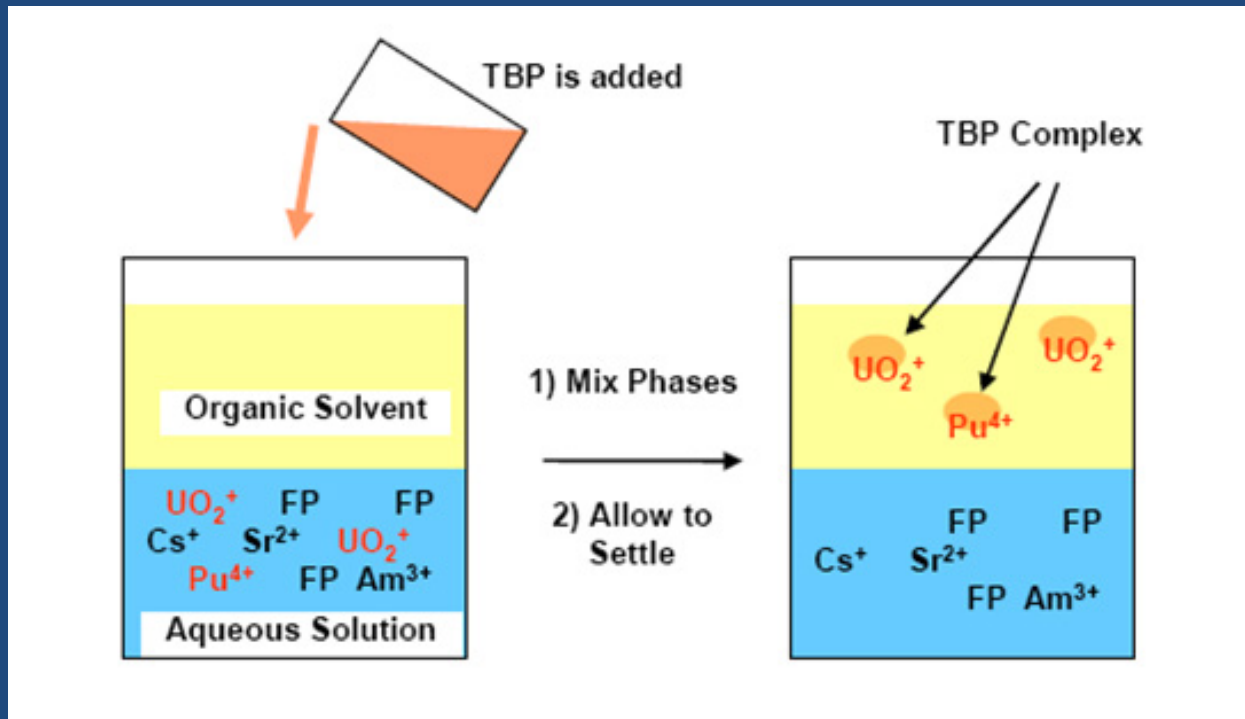
Različice PUREX-a

- ◎ UREX (uranium extraction)
 - Ne loči Pu
 - Povrne jod (95%), tehnecij (90%), tudi cezij
- ◎ UREX+
 - Najprej U in Tc, nato Pu + transuranski el.
 - Odpadek fisijski produkti (VRO)
- ◎ UNEX
 - Odstrani radioizotope (Sr, Cs, minorne aktinide)
- ◎ TRUEX
 - Odstrani transuranske kovine (Am, Cm)
 - Zmanjša sevanje alfa v odpadku

Druga varianta PUREX-a

COEX

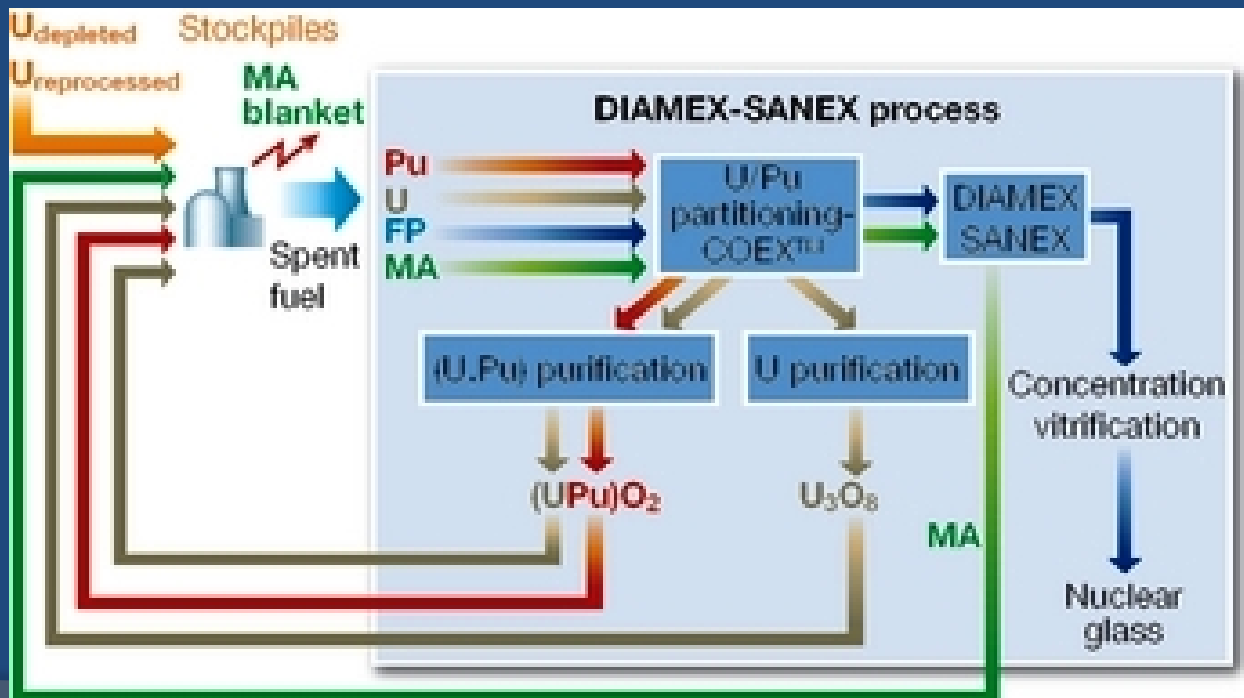
- Koekstrakcija U in Pu (ter Np), ali samo U



Druge variante PUREX-a

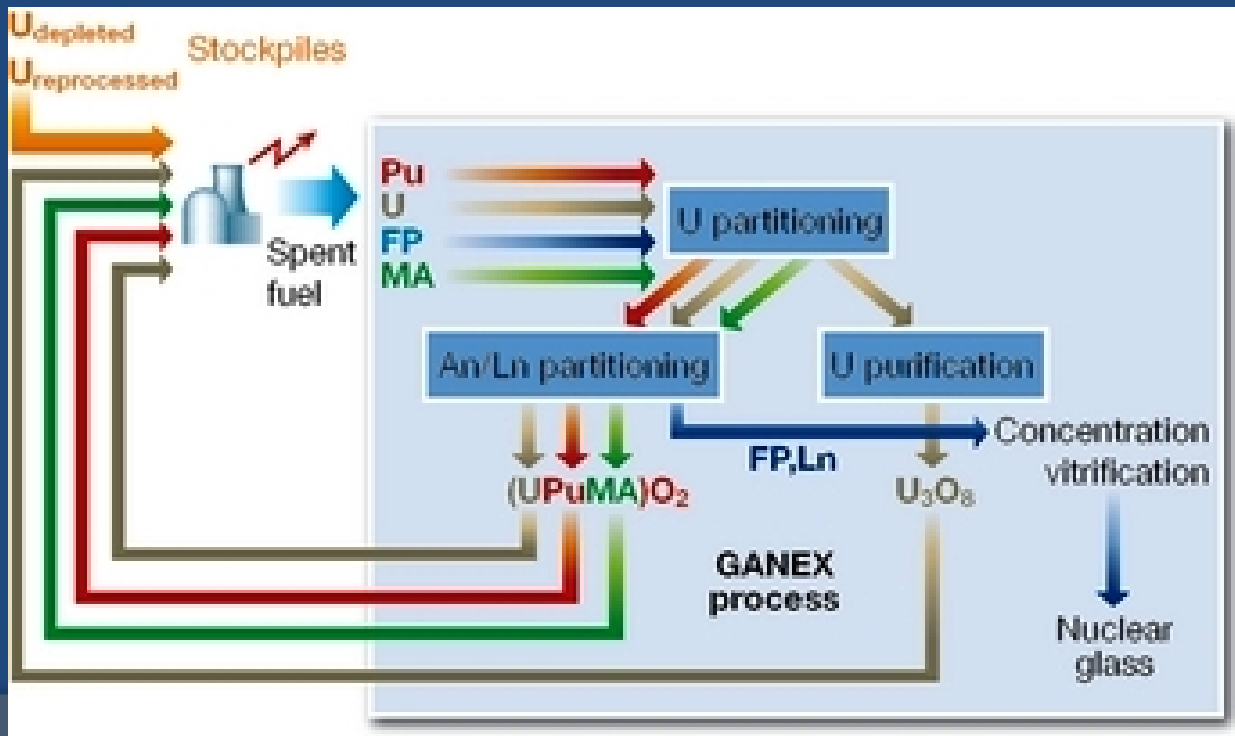
◉ DIAMEX – SANEX

- Ločimo dolgožive radionuklide (Am, Cm)
- Sledi COEX-u, ločimo U-Pu od aktinidov



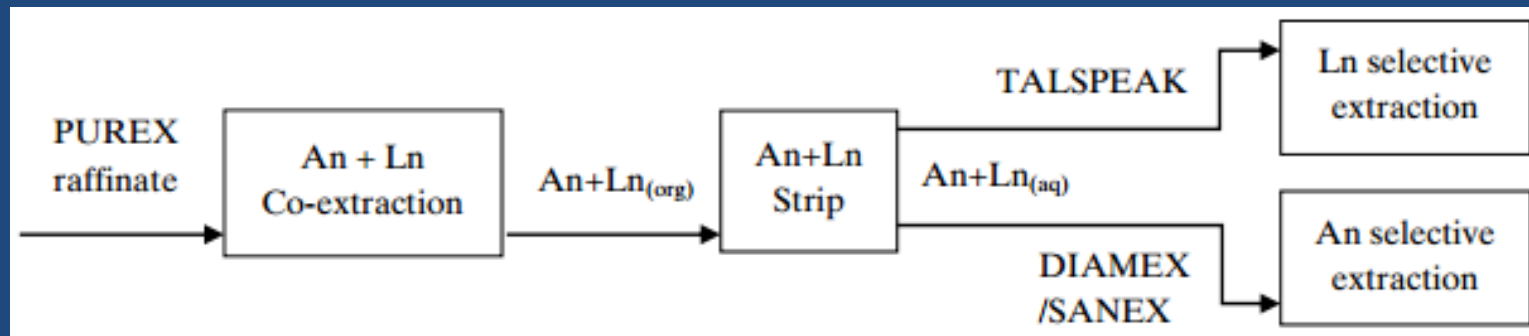
Druge variante PUREX-a

- GANEX (grouped extraction of actinides)
 - U + Pu (COEX), potem loči aktinide in lantanide od kratkoživih fisijkih produktov



V razvoju

◎ TALSPEAK

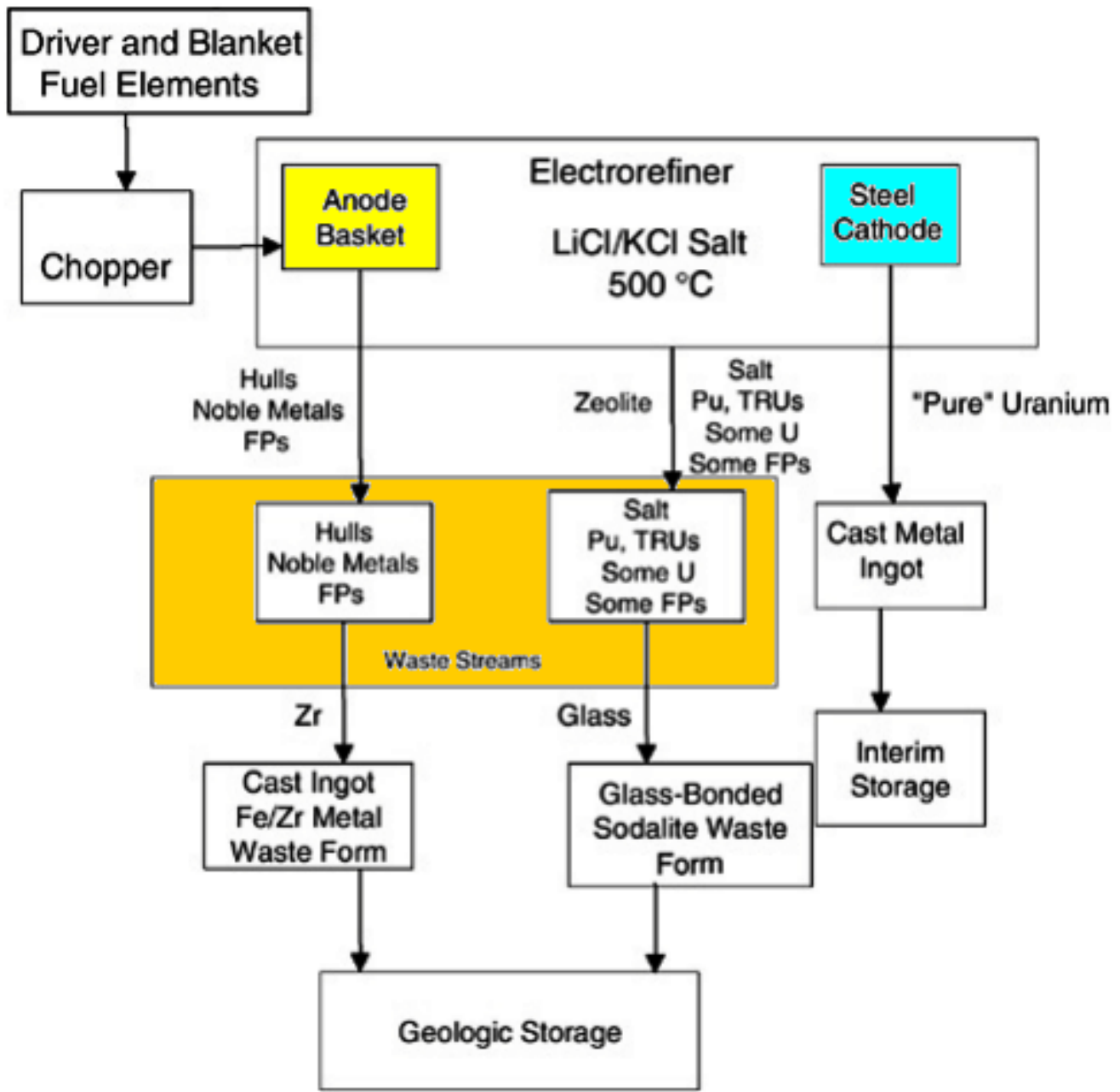


◎ Super – DIREX

- Gorivo MOX in U (iz LWR in hitrih reaktorjev)
- Dušikova kislina s TBP in superkritičnim CO₂
- Dobimo U, Pu in aktinide

Elektrometalurško piroprocesiranje

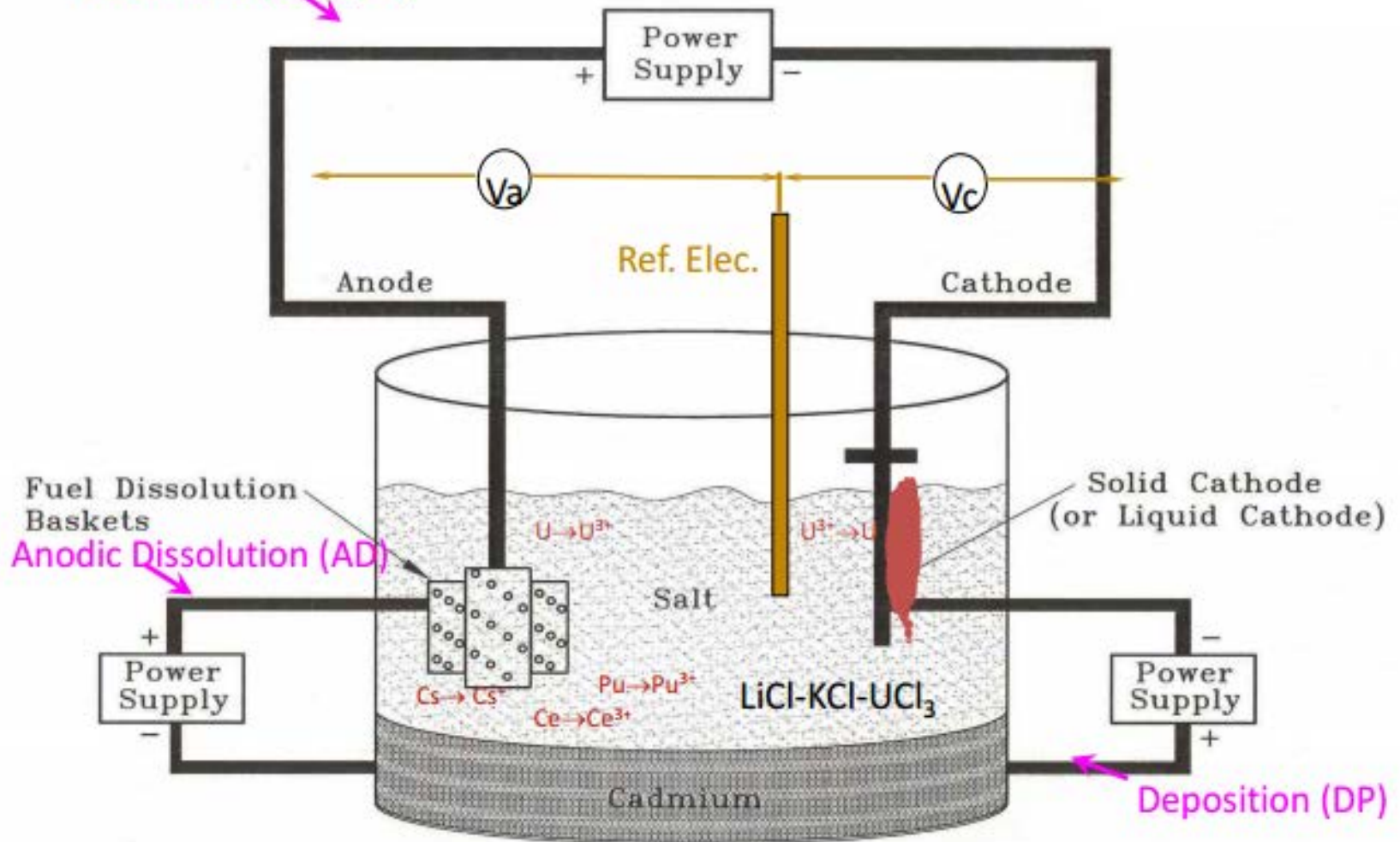
- ⦿ Uporaba za visoko izgorelo gorivo, hitro ohladljivo gorivo (visoke T obdelave)
- ⦿ Elektrokemijska ločitev aktinidov od FP, srajčke in Na (reagira z vodo)
- ⦿ Delovanje
 - Staljena klorova sol
 - Gorivo k anodi
 - Električni tok raztopi U, transuranske el. in kovinske fisijske produkte
 - Redukcija, dobimo čist U na jekleni katodi
 - Sekundarna katoda (staljeni Cd) – dobimo U in transuranske el.



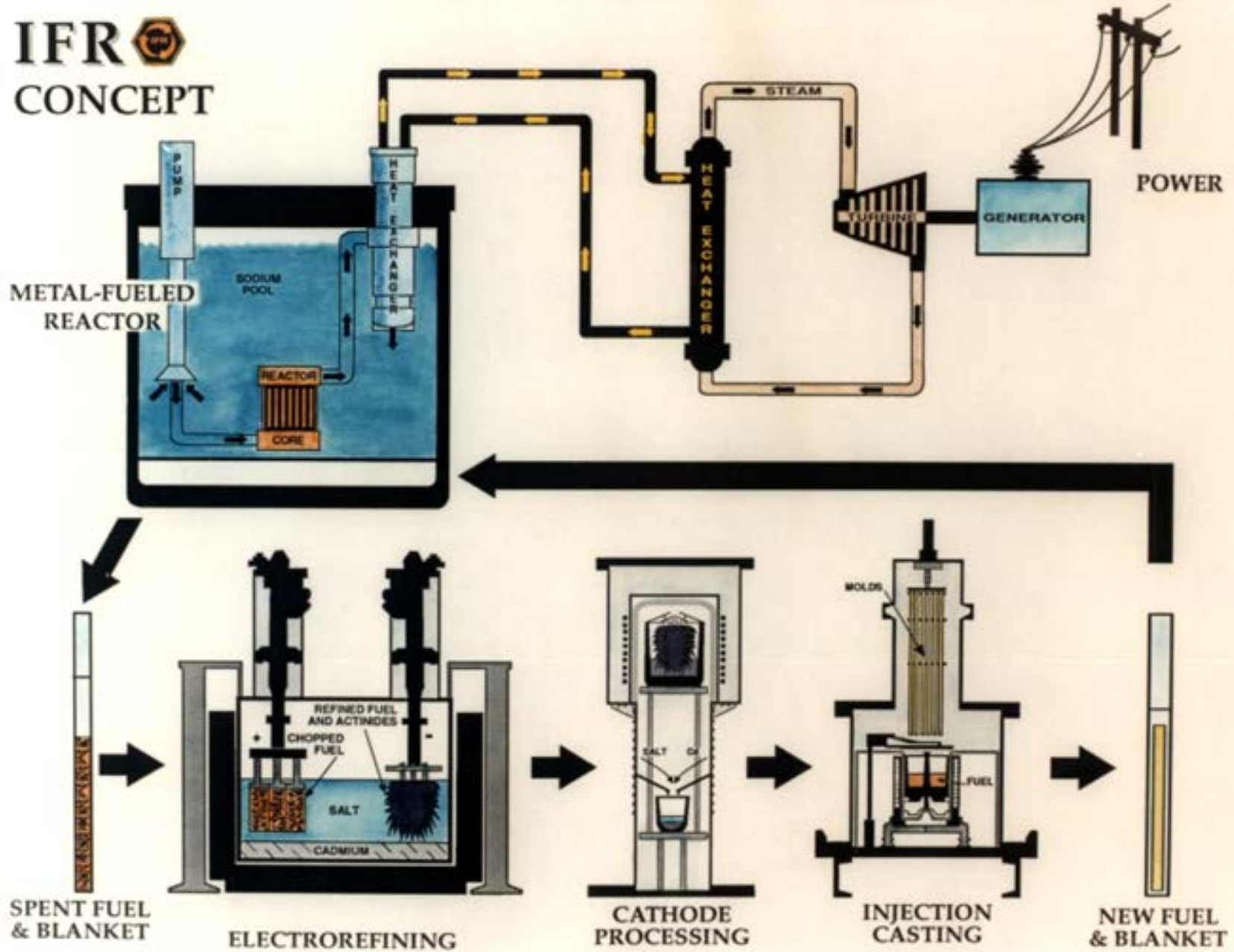
IFR (integral fast reactor)

- ◉ Deluje na elektrometalurški tehniki z licenco z znatnim obsegom
- ◉ Procesira gorivo iz EBR-II eksperimentalnega hitrega reaktorja (obratoval 63'-94')
- ◉ Ne recikliramo U in Pu
- ◉ Lajšanje odlaganja VRO
- ◉ U se raztopi v LiCl + KCl staljeni kopeli in naloži na trdni katodi
- ◉ Srajčka in plemeniti kovinski FP ostanejo na anodi (odpadek)
- ◉ Transuranski el. in FP v soli (keramični odpadek)

Direct Transport (DT)



IFR CONCEPT



Pyro – A

- Sledi UREX-u
- Ločitev transuranskih el. in FP (iz denitracije UREX rafinata)
- Nitrati v okside, sledi redukcija
- Cs, Sr se ne zreducirata, ostaneta v soli
- Transuranski el. na trdno katodo, ločitev od FP
- FP zmešani z zeolitom (keramični odpadek)
- Transuranski el. (v transmutacijske tarče)

Pyro – B

- ⦿ Gorivo iz transmutacijskega (hitrega) reaktorja
- ⦿ Gorivo brez U, vsebuje transuranske el.
- ⦿ Ločimo transuranske el. od FP

Recikliranje goriva v LWR, PHWR in CANDU

⦿ LWR

- Recikliramo pretvorjen in obogaten RepU

⦿ PHWR

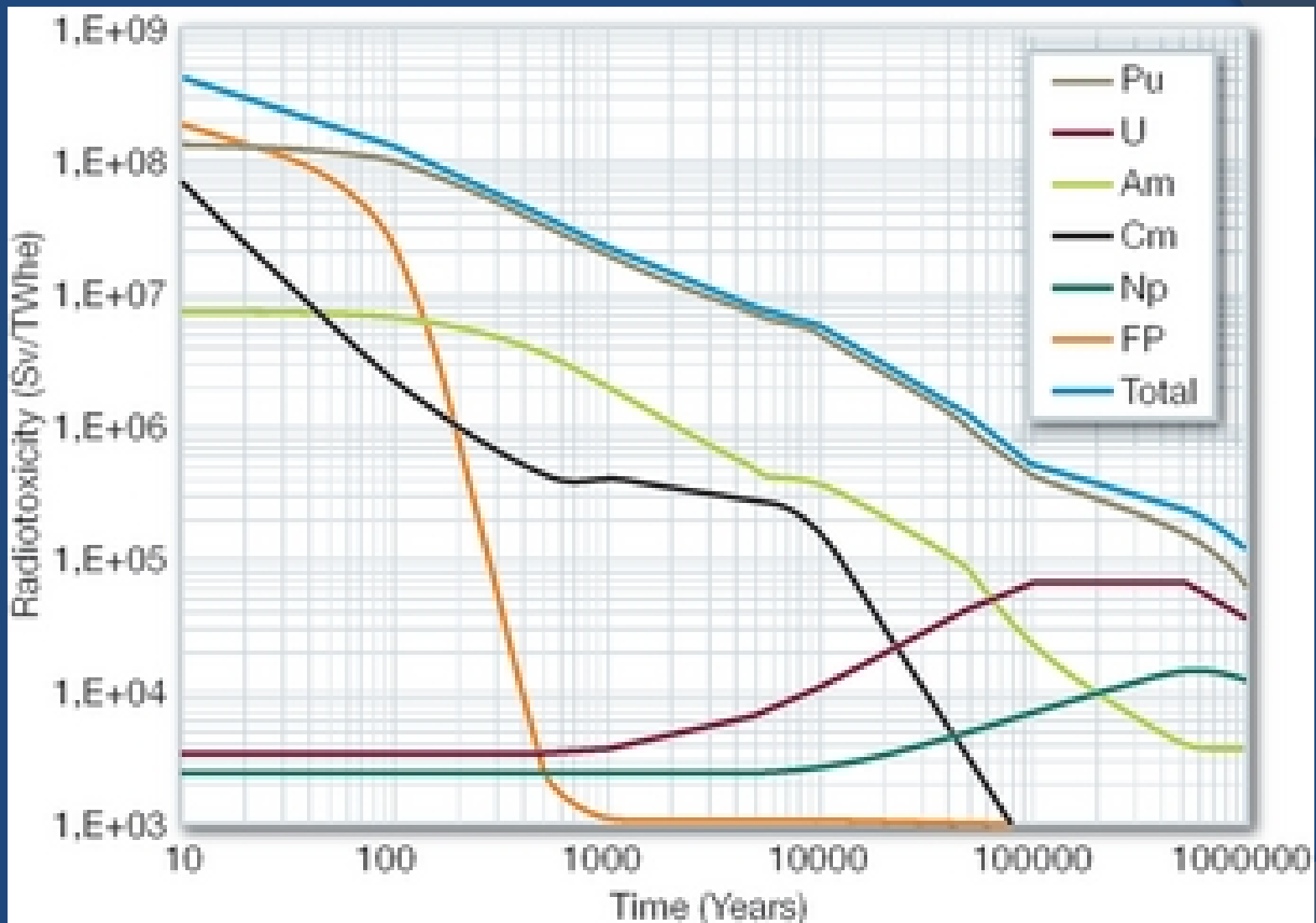
- Recikliramo rabljeno gorivo direktno iz LWR
- RepU ali RepU + osiromašeni U

⦿ CANDU

- rabljeno gorivo direktno iz LWR

Transmutacije

- ⊙ Spreminjanje
 - (dolgoživih) aktinidov v FP
 - Dolgožive FP v kratkožive nuklide
- ⊙ Cilj: odpadki postanejo nenevarni v nekaj 100 letih
- ⊙ Nevtronska bombardiranja v reaktorju, pospeševalniku (večinoma hitri n)



● Spreminjanje radiotoksičnosti elementov

Literatura

- <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Processing-of-Used-Nuclear-Fuel/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reprocessing
- <http://en.wikipedia.org/wiki/PUREX>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Sellafield>
- <http://www.if.uidaho.edu/~vutgikar/Fall2010/SNF/Lecture10.pdf>
- <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/164393.pdf>
- <http://www.neimagazine.com/features/featureactinide-recycling-within-closed-fuel-cycles/>
- <http://nsspi.tamu.edu/nsep/courses/the-nuclear-fuel-cycle/back-end-of-the-fuel-cycle/reprocessing/reprocessing-part-2>