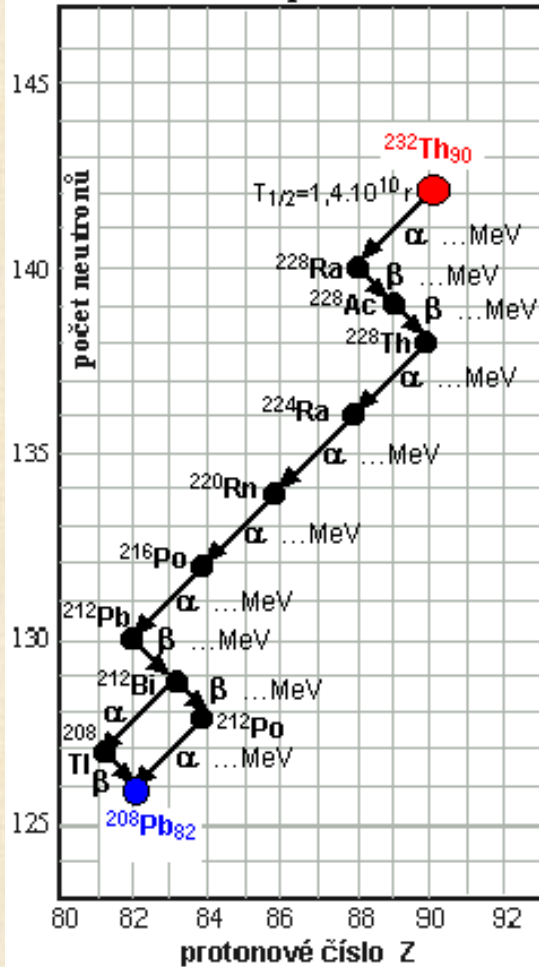


# Chemie některých těžkých prvků

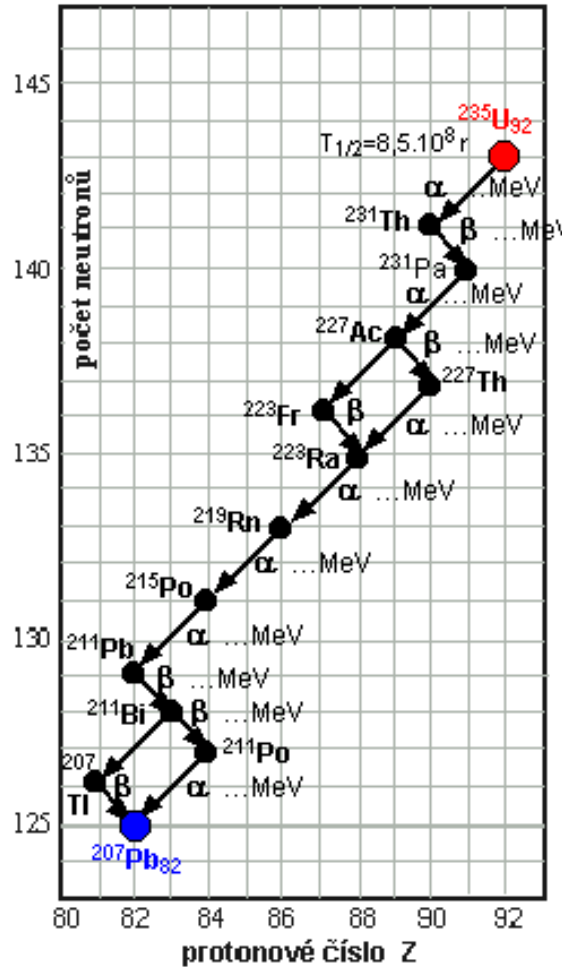
- Přírodní nuklidy Th, U
- Transuranové prvky (metody přípravy, chemie, ostatní využitelné vlastnosti)
- Nejnovější objevy

# Přeměnové řady

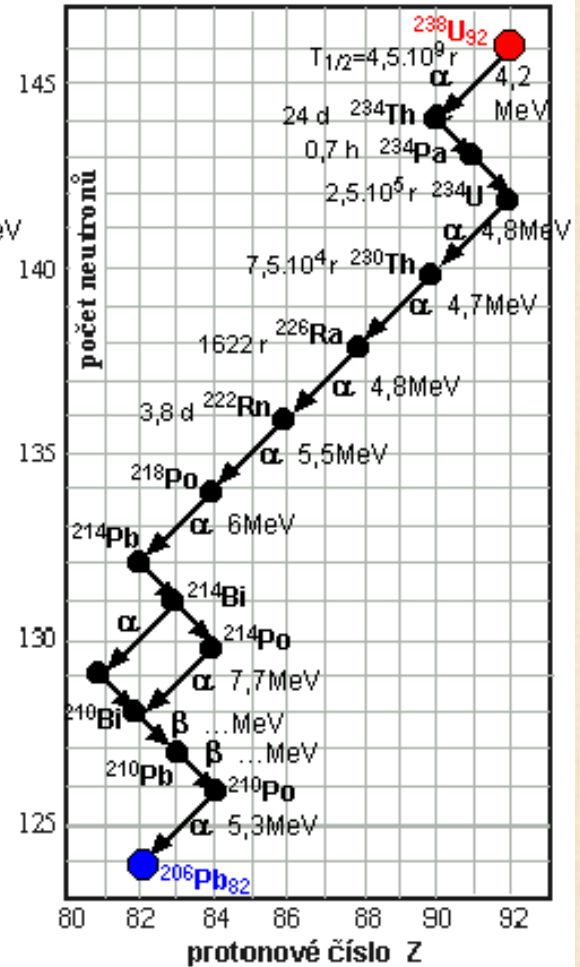
Thoriová rozpadová řada



Uranová řada  $^{235}\text{U}$



Uranová řada  $^{238}\text{U}$



# Thorium

## Výskyt thoria v přírodě

Průměrný obsah thoria v zemské kůře je 8 ppm. V přírodě se thorium ve formě izotopu  $^{232}\text{Th}$ , obvykle v doprovodu **lanthanoidů**, vyskytuje zejména v monazitových horninách. Známými minerály thoria jsou např. **thorit** (*huttonit*)  $\text{ThSiO}_4$ , **thorianit**  $\text{ThO}_2$ , **brabantit**  $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ , **ekanit**  $\text{ThCa}_2\text{Si}_8\text{O}_{20}$ , **brockit**  $(\text{Ca},\text{Th},\text{Ce})(\text{PO}_4)\cdot(\text{H}_2\text{O})$ , **thorutit**  $(\text{Th},\text{U},\text{Ca})\text{Ti}_2(\text{O},\text{OH})_6$ .



## Monazitový písek

směsné fosforečnany typu  $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Th}, \text{Nd}, \text{Y})\text{PO}_4$ , ve kterých je hmotností podíl thoria až 6 %

Ve sloučeninách vystupuje **thorium nejčastěji v oxidačním stupni IV**, chemické vlastnosti sloučenin čtyřmocného thoria se velmi **podobají vlastnostem sloučenin titanu**.

# Výroba thoria

- Výroba thoria se provádí **alkalickým nebo kyselým loužením rudných koncentrátů**.
- **Alkalický postup** spočívá v působení NaOH při zvýšené teplotě. Vzniklé nerozpustné oxidy thoria a [uranu](#) se rozpustí v horké kyselině chlorovodíkové. Oddělení thoria od uranu se provádí kapalinovou extrakcí.
- **Při kyselém postupu** se rudný koncentrát podrobí působení koncentrované kyseliny sírové, vznikne roztok sloučenin thoria znečištěný kovy vzácných zemin. Po převedení na šťavelany se na základě rozdílné rozpustnosti oddělí šťavelan thoria od šťavelanů vzácných zemin.
- **Výsledným produktem obou postupů je práškové thorium**, které se převádí na kompaktní kov slinováním nebo vakuovým přetavováním.
- **Čisté thorium** se připravuje tepelným rozkladem jodidu  $\text{ThI}_4$ , redukcí oxidu thoričitého [vápníkem](#) nebo elektrolýzou taveniny podvojného fluoridu  $\text{ThF}_4 \cdot \text{KF}$ .

# Chemické vlastnosti a reakce thoria

- Thorium je radioaktivní prvek
- šedý, měkký a tažný kov, vzhledem podobný [platině](#).
- **Práškové thorium je pyroforické**, kovové thorium se na vzduchu vznítí při zahřátí na teplotu 130°C.
- Při laboratorní teplotě reaguje s [fluorem](#) za vzniku fluoridu thoričitého **ThF<sub>4</sub>**, při teplotách okolo 500°C reaguje thorium s ostatními [halogeny](#) za vzniku halogenidů typu **ThX<sub>4</sub>** a se [sírou](#) za vzniku sulfidu thoričitého **ThS<sub>2</sub>** s příměsí sulfidu thoritého **Th<sub>2</sub>S<sub>3</sub>**. Při vyšších teplotách reaguje také s [dusíkem](#) za vzniku nitridu **Th<sub>3</sub>N<sub>4</sub>** a s [křemíkem](#) za vzniku silicidu **ThSi<sub>2</sub>**.
- Při zahřátí na teplotu 250°C na vzduchu hoří za vzniku **oxidu thoričitého ThO<sub>2</sub>**.
- Za teploty od 150°C probíhá reakce thoria s **vodní párou za vzniku hydroxidu thoričitého** a vývoje vodíku:



# Izotopy thoria

Izotop	poločas rozpadu	druh rozpadu	produkt rozpadu
$^{209}\text{Th}$	3,8 ms	$\alpha$	$^{205}\text{Ra}$
$^{210}\text{Th}$	9 ms	$\alpha$ (99 %)/ $\epsilon$ (1 %)	$^{206}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{210}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{211}\text{Th}$	40 ms	$\alpha$	$^{207}\text{Ra}$
$^{212}\text{Th}$	30 ms	$\alpha$ (99,7 %)/ $\epsilon$ (0,3 %)	$^{208}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{212}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{213}\text{Th}$	144 ms	$\alpha$	$^{209}\text{Ra}$
$^{214}\text{Th}$	100 ms	$\alpha$	$^{210}\text{Ra}$
$^{215}\text{Th}$	1,2 s	$\alpha$	$^{211}\text{Ra}$
$^{216}\text{Th}$	26 ms	$\alpha$ (99,99 %)/ $\epsilon$ (0,01 %)	$^{212}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{216}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{217}\text{Th}$	241 $\mu\text{s}$	$\alpha$	$^{213}\text{Ra}$
$^{218}\text{Th}$	117 ns	$\alpha$	$^{214}\text{Ra}$
$^{219}\text{Th}$	1,05 $\mu\text{s}$	$\alpha$	$^{215}\text{Ra}$
$^{220}\text{Th}$	9,7 $\mu\text{s}$	$\alpha$ (100,00 %)/ $\epsilon$ ( $2 \times 10^{-7}$ %)	$^{216}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{220}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{221}\text{Th}$	1,68 ms	$\alpha$	$^{217}\text{Ra}$
$^{222}\text{Th}$	2,237 ms	$\alpha$	$^{218}\text{Ra}$
$^{223}\text{Th}$	0,6 s	$\alpha$	$^{219}\text{Ra}$
$^{224}\text{Th}$	0,81 s	$\alpha$	$^{220}\text{Ra}$
$^{225}\text{Th}$	8,72 min	$\alpha$ (90 %)/ $\epsilon$ (10 %)	$^{221}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{225}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{226}\text{Th}$	30,57 min	$\alpha$	$^{222}\text{Ra}$
$^{227}\text{Th}$	18,68 d	$\alpha$	$^{223}\text{Ra}$
$^{228}\text{Th}$	1,911 6 r	$\alpha$ (100 %)/ $\epsilon$ ( $10^{-11}$ %)	$^{224}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{228}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{229}\text{Th}$	7 880 r	$\alpha$	$^{225}\text{Ra}$
$^{230}\text{Th}$	75 400 r	$\alpha$ (100 %)/ $\epsilon$ ( $6 \times 10^{-11}$ %)	$^{226}\text{Ra}$ ( $\alpha$ ) $^{230}\text{Ac}$ ( $\epsilon$ )
$^{231}\text{Th}$	25,52 h	$\beta^-$ (100 %)/ $\alpha$ ( $4 \times 10^{-11}$ %)	$^{231}\text{Pa}$ ( $\beta^-$ ) $^{227}\text{Ra}$ ( $\alpha$ )
$^{232}\text{Th}$	$1,4 \times 10^{10}$ r	$\alpha$	$^{228}\text{Ra}$
$^{233}\text{Th}$	21,83 min	$\beta^-$	$^{233}\text{Pa}$
$^{234}\text{Th}$	24,10 d	$\beta^-$	$^{234}\text{Pa}$
$^{235}\text{Th}$	7,2 min	$\beta^-$	$^{235}\text{Pa}$
$^{236}\text{Th}$	37,3 min	$\beta^-$	$^{236}\text{Pa}$
$^{237}\text{Th}$	4,7 min	$\beta^-$	$^{237}\text{Pa}$
$^{238}\text{Th}$	9,4 min	$\beta^-$	$^{238}\text{Pa}$

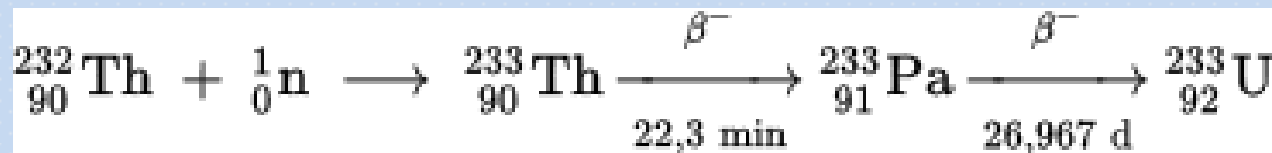
# Reakce thoria s kyselinami a zásadami

- **Ve zředěných kyselinách i zásadách se thorium nerozpouští, ale je dobře rozpustné v lučavce královské a v dýmavé kyselině chlorovodíkové.**
- **Dobře se rozpouští v koncentrované kyselině dusičné i chlorovodíkové za vzniku thoričité soli a vývoje vodíku, reakce thoria s těmito kyselinami je katalyzována přítomností fluoridových iontů:**



# Thorium jako potenciální štěpný materiál

1. Thorium je v jaderném reaktoru přeměňováno na  $^{233}\text{U}$ , který se dále přímo účastní další štěpné reakce a postupně se v tomto prostředí jaderně přeměňuje za vzniku energetického výtěžku. V tomto případě je do jaderného reaktoru vsazován poměrně nízký obsah thoria.



2. Cílem jaderné přeměny v reaktoru je příprava maximálního množství jader  $^{233}\text{U}$ , která jsou následně oddělena a slouží jako jaderné palivo v jiném atomovém reaktoru. **Zde je naopak do jaderné reakce nasazeno maximální množství  $^{232}\text{Th}$  a přeměna na  $^{233}\text{U}$  je důležitější než energetický výtěžek procesu.**
3. Zdrojem energie je v tomto případě až následné jaderné štěpení  $^{233}\text{U}$  v dalším reaktoru. **Nevýhodou tohoto procesu je nutnost přepracování paliva** z prvního reaktoru na čistý  $^{233}\text{U}$ , protože produkty vzniklé ozařováním thoria jsou značně silnými radioaktivními zářiči a separaci je třeba provádět za zvýšených bezpečnostních podmínek.



# Další využití

- Ve [slutinách hořčíku](#) zlepšují malé přídavky thoria mechanickou odolnost materiálu.
- Thorium lze použít jako materiál elektrod pro [obloukové svařování](#).
- Ve [sklářském průmyslu](#) se přídavkem thoria do skloviny docílí zvýšení [indexu lomu](#) a snížení rozptylu světla vyrobeného skla. Takové sklo slouží především jako materiál v optických aplikacích, např. čočky pro filmové kamery nebo vědecké přístroje.
- [Oxid thoričitý](#)  $\text{ThO}_2$  je značně odolný vůči vysokým teplotám a vyrábějí se z něj tavicí kelímky a chemické nádoby určené pro práci s agresivními materiály za vysokých teplot. Oxid thoričitý je také využíván pro výrobu punčošek v plynových lampách.
- Oxid thoričitý  $\text{ThO}_2$  slouží jako průmyslový [katalyzátor](#) v [chemickém průmyslu](#) při výrobě [kyseliny dusičné](#) z [amoniaku](#), při výrobě [kyseliny sírové](#) nebo při [krakování ropy](#).

# Uran



V přírodě je uran obsažen ve směsi izotopů  $^{238}\text{U}$  ( $99,2739 \pm 0,0007$  %),  $^{235}\text{U}$  ( $0,7204 \pm 0,0007$  %) a  $^{234}\text{U}$  ( $0,0057 \pm 0,0007$  %) [23].

# Obecné vlastnosti uranu

Tabulka 1. Fyzikální vlastnosti uranu

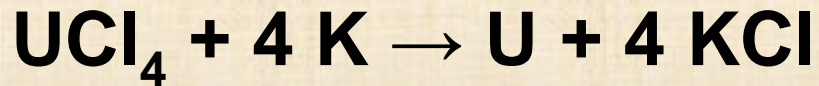
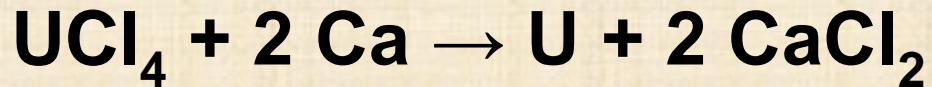
Skupenství <sup>1</sup>	Teplota tání (°C)	Teplota varu (°C)	Hustota (g·cm <sup>-3</sup> )
pevné	1132	3818	19,05

Uran není příliš tvrdý a za normálních teplot se dá kovat a válcovat. Při zahřívání se stává nejdříve křehkým a poté plastickým materiálem. Rozdrcením na jemný prášek se stává pyroforický.

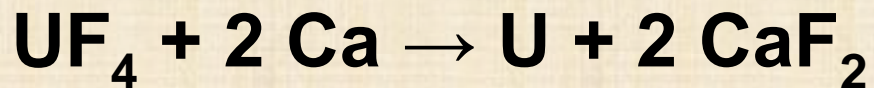
Tabulka 2. Chemické vlastnosti uranu

Atomové číslo	Elektronová konfigurace	Elektronegativita <sup>2</sup>	Oxidační stavy <sup>3</sup>
92	[Rn]5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	1,38	II, III, IV, V, VI

# Příprava a výroba uranu



Běžný způsob přípravy čistého kovového uranu pro použití v [atomových reaktorech](#) je založen na [redukci fluoridu uraničitého](#) kovovým vápníkem:



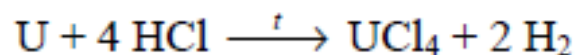
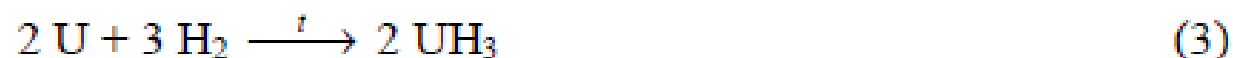
Uran je lesklý kov, který se však na vzduchu pomalu pokrývá vrstvou oxidů. Při vyšších teplotách je velmi reaktivní. Má značnou afinitu ke kyslíku, již při mírném zahřívání shoří na směsný oxid  $U_3O_8$ . Snadno se slučuje s halogeny, s fluorem dává fluorid uraničitý:



Síra reaguje s uranem pomalu při teplotě nad 250 °C za vzniku sulfidu uraničitého:



Uran se slučuje také s vodíkem za vzniku hydridu uranitého:



Tabulka 3. Sloučeniny uranu v oxidačním čísle II, III a V.

Oxidační stupeň	Sloučeniny	
	Název	Vzorec
II	oxid uranový	UO
III	fluorid uranový	UF <sub>3</sub>
	chlorid uranový	UCl <sub>3</sub>
	bromid uranový	UBr <sub>3</sub>
	jodid uranový	UI <sub>3</sub>
	hydrid uranový	UH <sub>3</sub>
V	fluorid uraničný	UF <sub>5</sub>
	chlorid uraničný	UCl <sub>5</sub>

# Uran (IV)

## Sloučeniny uranu v oxidačním stavu IV

Oxid uraničitý  $\text{UO}_2$  se získává zahříváním oxidu uranového  $\text{UO}_3$  nebo směsného oxidu  $\text{U}_3\text{O}_8$  v proudu vodíku jako hnědočerný prášek. Je prakticky nerozpustný ve vodě a v alkalických hydroxidech. Nesnadno se také rozpouští v kyselinách, s výjimkou kyseliny dusičné  $\text{HNO}_3$ , se kterou poskytuje dusičnan uranylu  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ .

Fluorid uraničitý  $\text{UF}_4$  je zelená krystalická látka, která se získává například působením fluoru na kovový uran. Fluorid uraničitý je velmi málo rozpustný ve vodě.

Chlorid uraničitý  $\text{UCl}_4$  tvoří tmavé zelené krystaly. Dá se připravit zahříváním směsi oxidu  $\text{U}_3\text{O}_8$  s uhlíkem v proudu chloru nebo reakcí oxidu uraničitého  $\text{UO}_2$  s chloridem uhličitým  $\text{CCl}_4$ :



Méně stálý je bromid uraničitý  $\text{UBr}_4$  a jodid uraničitý  $\text{UI}_4$ .

# Uran (VI)

## Sloučeniny uranu v oxidačním stavu VI

Oxid uranový  $\text{UO}_3$  lze získat zahříváním dusičnanu uranylu  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  nebo urananu amonného  $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_4$  jako oranžovo-červený prášek. Oxid uranový je amfoterní – slučuje se se zásaditými oxidy za vzniku uranátů a s kyselinami tvoří soli uranylu:



Intenzivním zahříváním přechází na zelenočerný oxid  $\text{U}_3\text{O}_8$ . Tento oxid se rozpouští v kyselinách za vzniku směsí solí uranylu a uraničitých a je považován za podvojný oxid uraničito-uranový  $\text{UO}_2 \cdot 2\text{UO}_3$ . Na základě magnetochemických měření však bývá také považován za podvojný oxid uranično-uranový  $\text{U}_2\text{O}_5 \cdot \text{UO}_3$  [17].



Fluorid uranový  $\text{UF}_6$  je poměrně stabilní bezbarvá krystalická látka. Snadno přechází na plyn sublimací, čehož se využívá při obohacování uranu (viz kapitola 2.3.4.)

Chlorid uranový  $\text{UCl}_6$  tvoří tmavě zelené až černé krystaly.

Uranany  $\text{M}_2\text{UO}_4$  tvoří žluté látky nerozpustné ve vodě. Významné jsou také diuranany  $\text{M}_2\text{U}_2\text{O}_7$ , z nichž nejznámější je tzv. uranová žluť  $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ , která se využívá k barvení skla a porcelánu.

Ze solí uranylu  $\text{UO}_2\text{X}_2$  (X-halogenidy) jsou nejběžnější hexahydrát dusičnanu uranylu  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a dihydrát octanu uranylu  $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

# Použití urananů a sloučenin uranylu

- Sloučeniny hexahydrát diurananu sodného ( $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) a hexahydrát diurananu draselného ( $\text{K}_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) se dosud označují jako uranová žluť používající se k barvení skla, glazur a porcelánu (barví na žluto až žlutozeleno, přičemž fluoreskuje). Zřejmě se jím však dá barvit i oranžově až rudě. Míra tohoto použití se však v minulosti výrazně snížila. V Česku jsou podle Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) 2 výrobci skla barveného uranem, podle<sup>[13]</sup> je v Česku vyráběné sklo zdravotně zcela neškodné i při silně konzervativním přístupu hodnocení zdravotního rizika.
- Ve fotografii se sloučenin (solí) uranu (např.  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  – dusičnan uranylu) používá k zesilování negativů, do tónovacích lázní, zesilovač světlotisku. Kvůli chemické toxicitě se dusičnan uranylu používá pro experimentální vyvolání patologického stavu ledvin u pokusných zvířat.
- Octan uranylu  $\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaUO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$  a diuranan amonný  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  má význam v analytické chemii.
- Uran s obsahem karbidu je vhodným katalyzátorem pro syntézu amoniaku Haberovým způsobem.

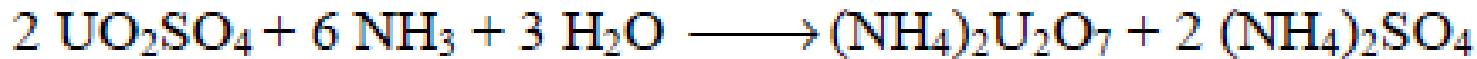


Soli uranylu mají  
žlutozelenou barvu  
– barvení skla

**Soli uranylu představují nejběžnější formu sloučenin uranu**  
**= radioaktivní materiál** - jiná forma evidence na SÚJB

# Zpracování uranové rudy

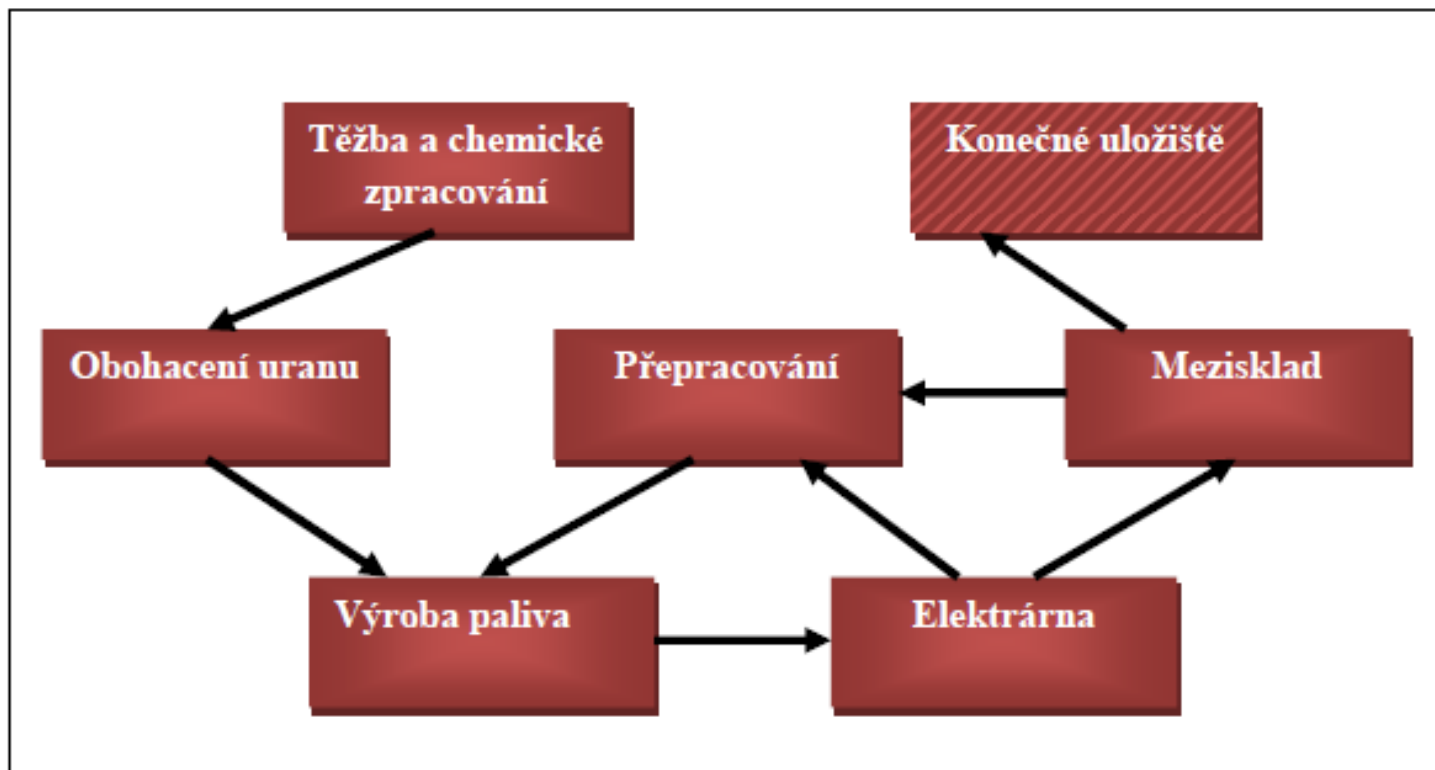
- Uranová ruda se po mechanickém zpracování louží kyselinou sírovou. Z roztoku se poté zaváděním amoniaku získá uranový koncentrát, diuranan amonný  $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$  tzv. **žlutý koláč** (yellow cake), který se používá pro výrobu jaderného paliva **provádí se např. v Dolní Rožínce**



K získání 1 kg jaderného paliva jsou třeba 2 až 4 tuny uranové rudy.

Pozn: Loužení uranové rudy kyselinou sírovou přímo v podzemí (Stráž pod Ralskem) již bylo opuštěno – ekologická zátěž.

# Využití uranu pro jaderně energetické účely

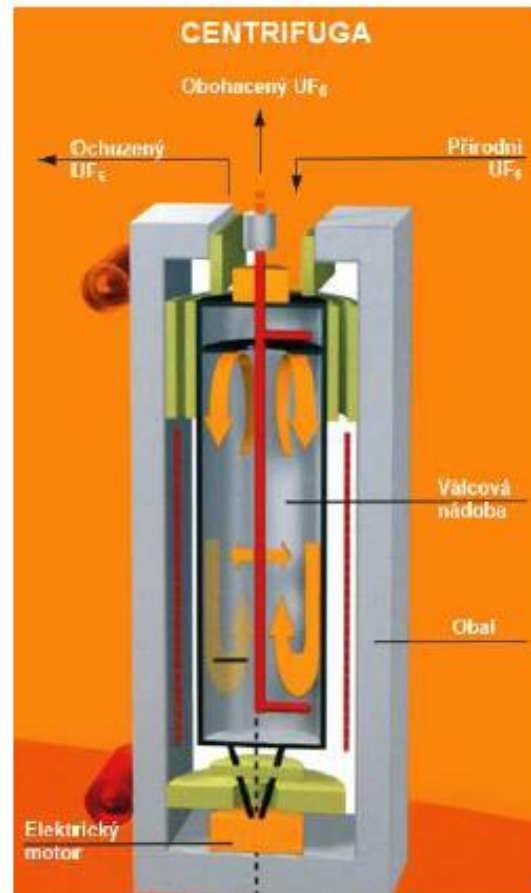


Obr. 12: Palivový cyklus

# Obohacování uranu

## První metoda– difuze pře pórovitou membránu dle Grahamova zákona

Druhá metoda využívá tzv. plynové centrifugy (odstředivky) – obrázek 16. Jedná se o zařízení válcovitého tvaru, kde na okrajích se nachází břity. Při vysokých otáčkách zde dochází k oddělení molekul s těžším izotopem  $^{238}\text{U}$  a molekul s izotopem  $^{235}\text{U}$  v důsledku působení odstředivé síly.

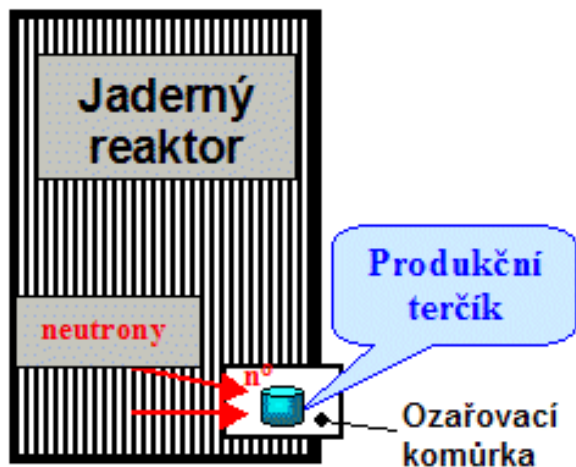


Obr. 16: Centrifuga pro obohacování uranu [29]

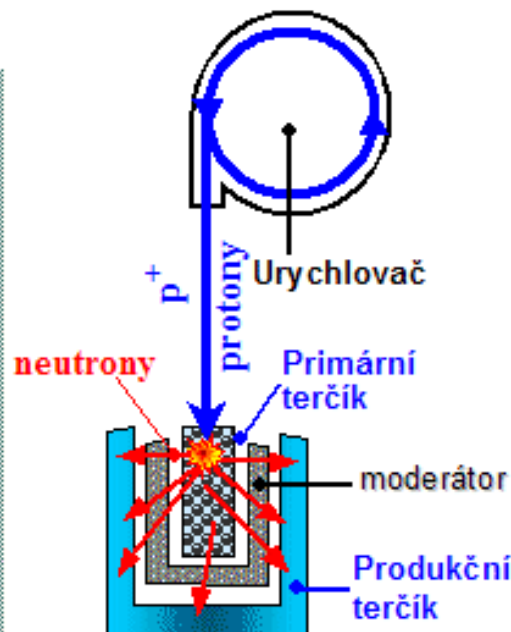
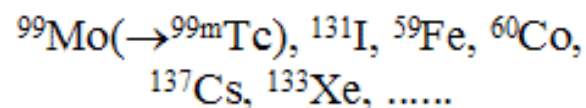
- **V centrifuze** o vysokých otáčkách dochází k dělení molekul jejich hmotnosti na základě rozdílného momentu hybnosti pohybujících se částic. Tento systém pracuje poměrně efektivně i pro poměrně hmotné částice s pouze mírně odlišnými hmotami a jeho účinnost je závislá především na rychlosti otáčení centrifugy.
- Pro dělení izotopů uranu se tento systém prakticky výlučně prosadil v 70. letech 20. století a je dnes hlavním průmyslovým zdrojem obohaceného uranu.
- 
- Dříve se obvykle používaly rotačky s ocelovými lopatkami, dosahujícími rychlosti kolem 330 m/s (rychlost zvuku), v současné době se prosazují materiály z uhlíkových vláken s rychlostí 600 m/s a teoretické možnosti využití vlastností Kevlaru dávají předpoklad dosáhnout až 1 100 m/s.
- Pro výrobu kvalitního štěpného materiálu je stále nezbytné použití kaskád odstředivek v řádu několika stovek až tisíc kusů, přesto je energetické náročnost procesu výrazně nižší, než při difuzním dělení izotopů.

# VÝROBA UMĚLÝCH RADIOISOTOPŮ

## Radionuklidy $\beta^-$

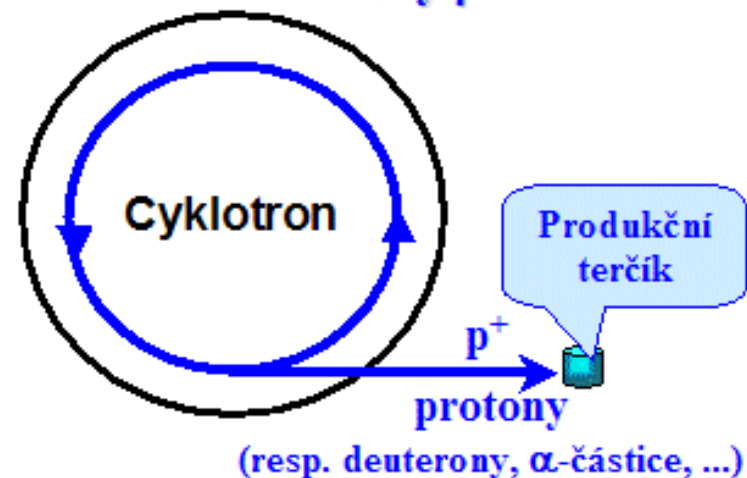


**Reakce  $(n, \gamma)$**  – záchyt neutronů  
– výroba  $\beta^-$ -zářičů v reaktoru :

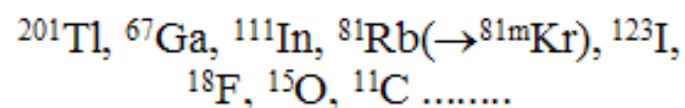


**Urychlovačem řízený neutronový generátor**

## Radionuklidy $\beta^+$

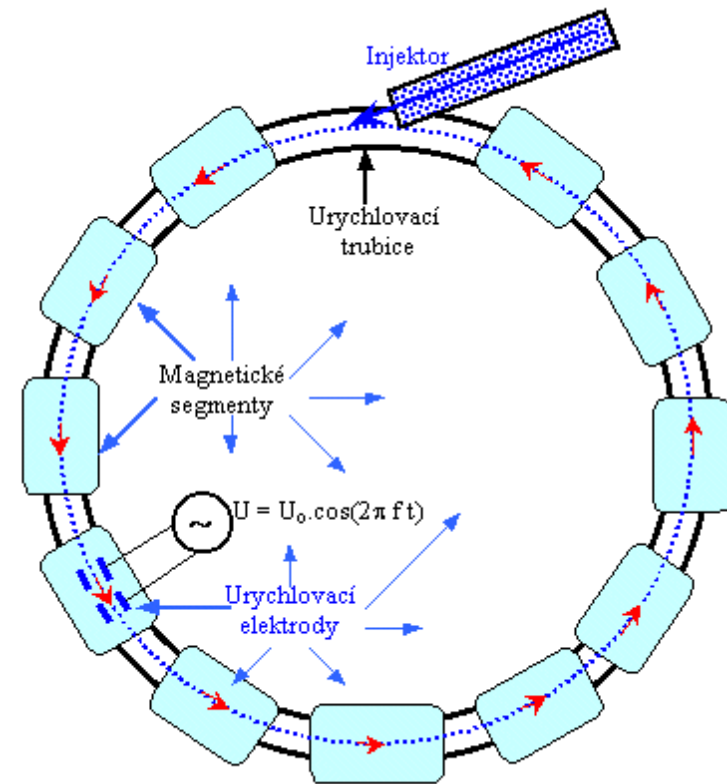
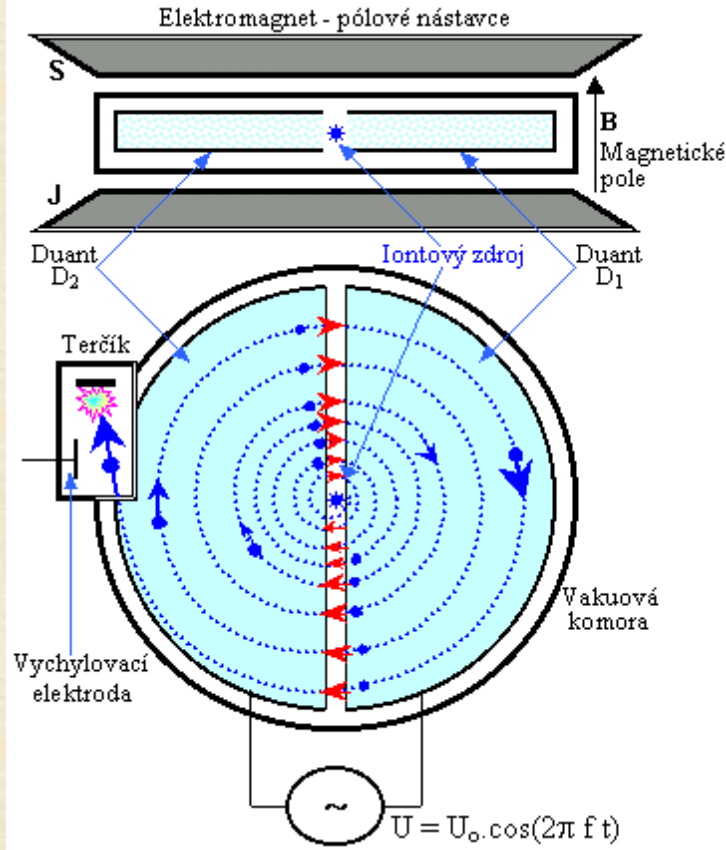


**Reakce  $(p, \gamma)$**  – výroba  $\beta^+$ -zářičů  
v urychlovači (cyklotronu) :





# Cyklotron



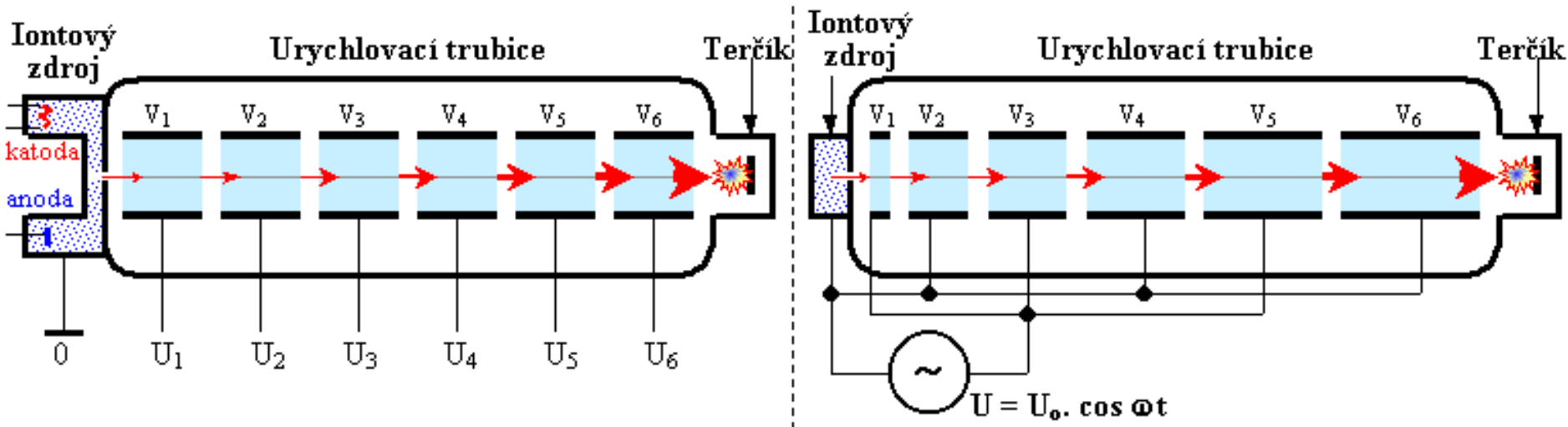
- Podle energie protonů může probíhat řada reakcí. Nejjednodušší z nich je radiační záchyt protonu (p, g):  ${}^N\mathbf{A}_Z + p^+ \rightarrow {}^{N+1}\mathbf{B}_{Z+1} + g$ , nastávají však i reakce typu (p, p), (p, n), (p, d), (p, a), zvláště při vyšších energiích a u těžších jader.

• Za účelem jaderné reakce a transmutace lze jádra ozařovat kromě protonů i jinými rychlými nabitými částicemi: **deuterony d** - dochází především k reakcím (d, n), (d, p), **a-částicemi** - nastávají reakce (a, p), (a, n), popř. i **těžšími jádry** či **ionty**.

## Lineární urychlovače

Lineární urychlovače urychlují nabité částice působením elektrického pole během jejich pohybu po lineární **přímkové dráze**. Lineární urychlovač se často zkráceně nazývá **Linac** (*Linear accelerator*).

Můžeme je rozdělit na **elektrostatické** (vysokonapěťové) a **vysokofrekvenční**.



K urychlení protonů	20 GeV
K urychlení ostatních jader (včetně uranu)	30 MeV

# Některé světové urychlovače

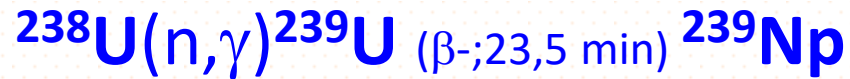
Název urychlovače	Laboratoř	Částice	Energie [GeV]	Rok
SLAC (Stanford Linear Accelerator Center )	Stanford	$e^- - e^+$	50	1966
Tevatron	Fermilab	$p^+ - p^-$	980	1987
LEP (Large Electron-Positron collider)	CERN	$e^- - e^+$	100	1989
RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider )	Brookhaven	$p-p, Au-Au, \dots$	200	2000
LHC (Large Hadron Collider)	CERN	$p-p, Pb-Pb, \dots$	7000	2008
VLHC (Very Large Hadron Collider) - budoucnost ??		$p-p, \dots$	? >>LHC ?	? >2030 ?
CLIC (Compact Linear Collider) - budoucnost ??		$e^- - e^+$	3000	??

# Transurany

- **Transurany** jsou prvky, které následují v Mendělejevově periodické soustavě za uranem.
- V 7. periodě se nachází radioaktivní aktinium, uměle připravené radioaktivní rutherfordium, dubnium, seaborgium, bohrium, hassium, meitnerium, darmstadtium, roentgenium a copernicium. Do samostatné skupiny aktinoidů je vyčleněno 14 vnitřně přechodných kovových prvků následujících za aktiniem.
- V přírodě se běžně nevyskytují, všechny se připravují uměle. Lehčí transurany, jako je neptunium, plutonium, americium a curium, jsou produkovány v lehkovodních jaderných reaktorech.
- Mají poměrně dlouhé poločasy přeměny a můžeme je tedy extrahovat z vyhořelého jaderného paliva chemickou cestou.

## Výroba lehčích transuranů ( $Z \leq 100$ ) – probíhá v jaderném reaktoru

$^{238}\text{U}$  se pomalými neutrony neštěpí, probíhá záchytná reakce



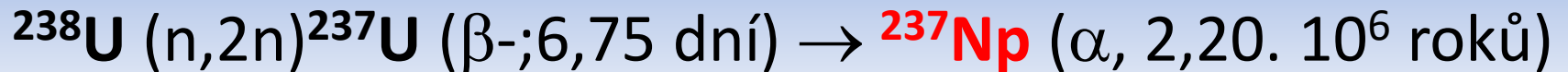
Při provozu jaderného reaktoru se v proto v palivu, které je převážně tvořeno  $^{238}\text{U}$ , hromadí sekundární štěpný materiál

**$^{239}\text{Pu}$**

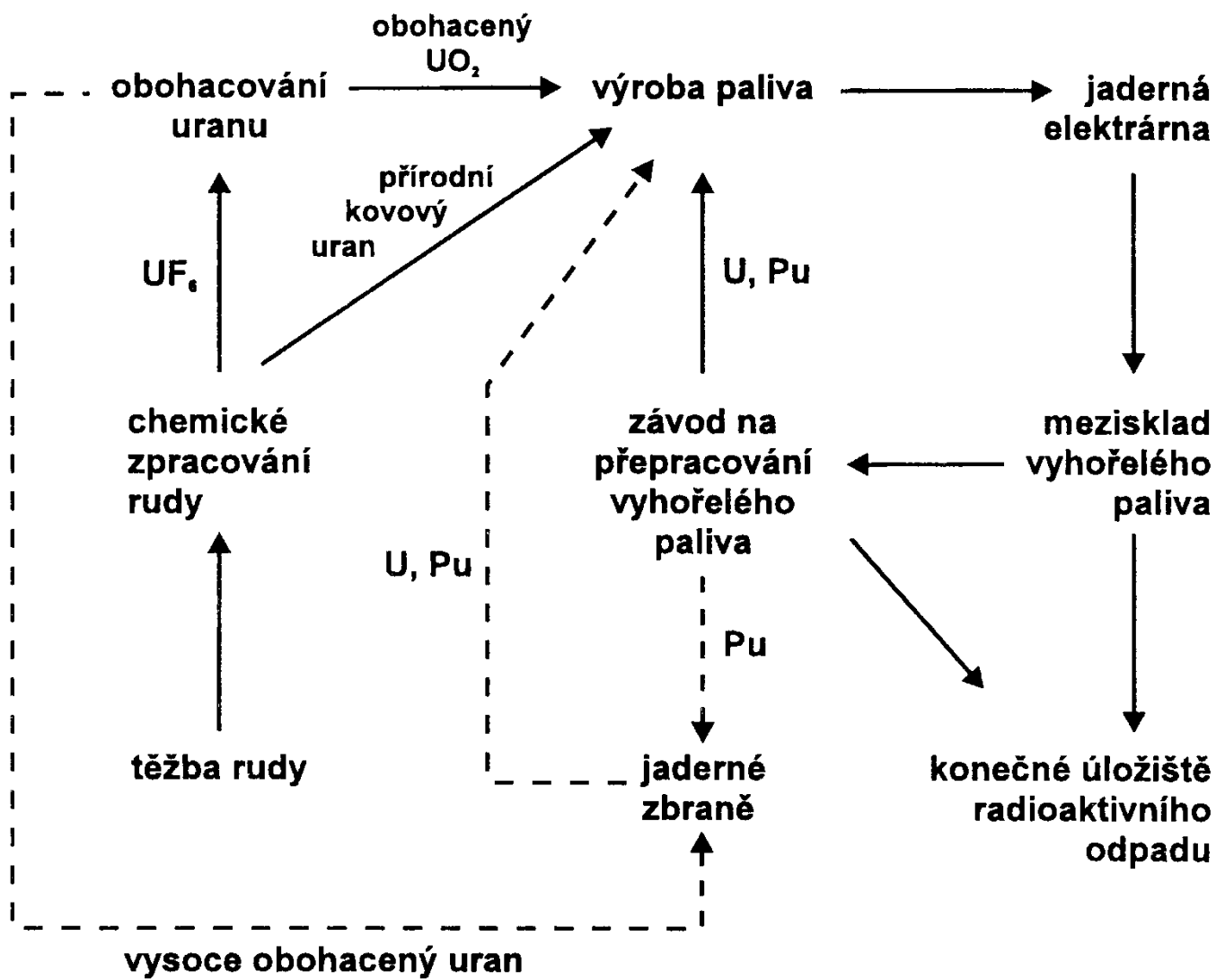
Z tohoto nuklidu mohou při delším ozařování vznikat záchytem neutronu i další radionuklidy

**$^{240}, ^{241}, ^{242}\text{Pu}$**

V jaderném palivu termického reaktoru, který pracuje na principu štěpení  $^{235}\text{U}$ , se hromadí  $^{237}\text{Np}$  (počáteční nuklid neptuniové řady)



# Získávání některých transuranů z použitého jaderného paliva



Palivový cyklus. (Čárkovaně je zakresleno využití vojenského štěpného materiálu pro výrobu paliva.)

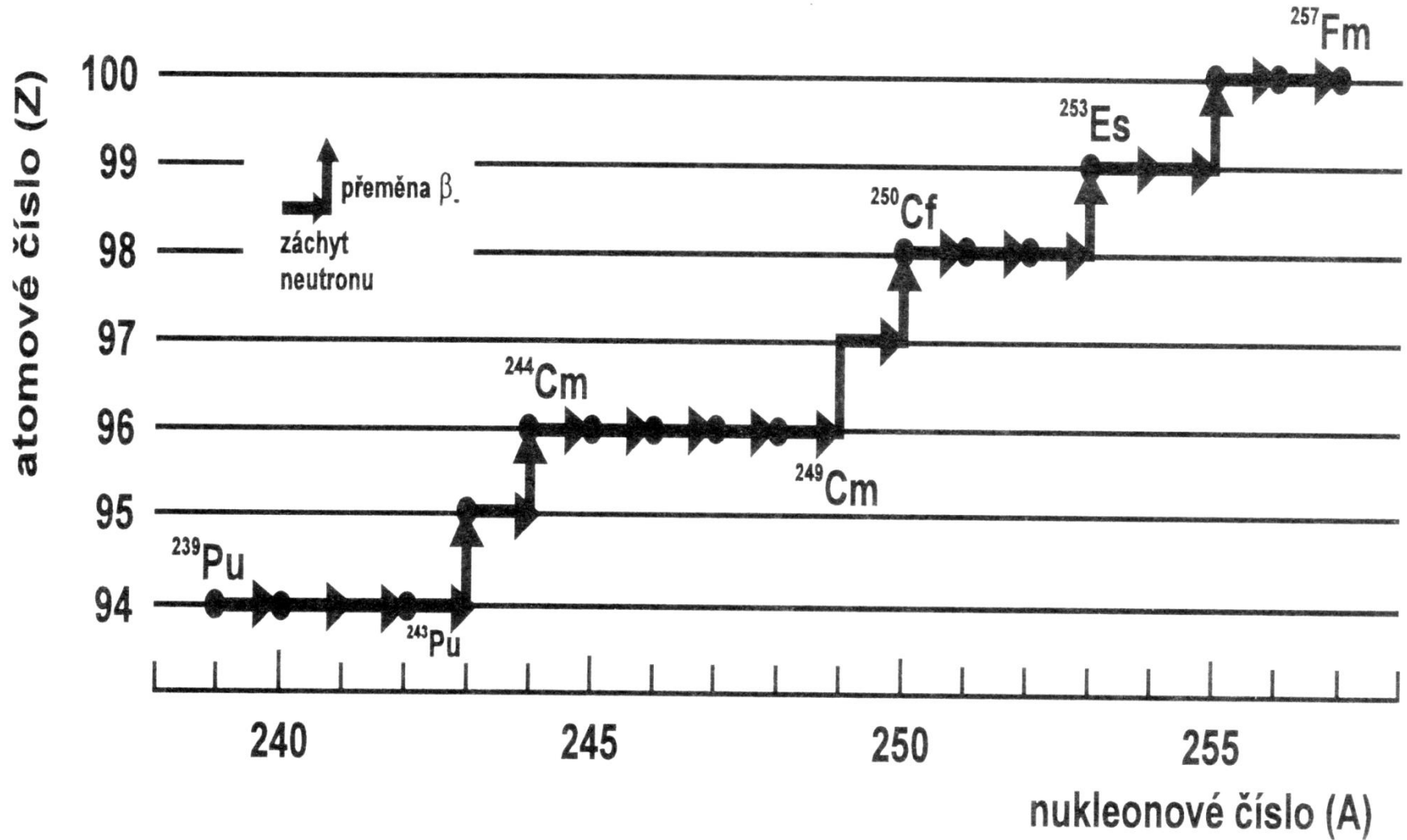
# Těžší transurany

## Příprava

- Výchozí materiál  $^{238}\text{U}$ , nejtěžší nuklid, který se vyskytuje v přírodě.
- Používají se dvě metody přípravy těžkých prvků:
  - Záchyt neutronů v reaktoru s konstantním neutronovým proudem: množství připravených transuranů je limitováno konkurencí mezi procesem radioaktivního rozpadu a jaderného štěpení. Toto je jediný proces poskytující važitelná množství trasuranů.
  - Neutronový záchyt v pulsním neutronovém proudu: Termonukleární explozí je produkován velmi intenzivní tok neutronů ( $10^{23} - 10^{25}$  neutronů  $\times \text{cm}^{-3}$ ) po dobu  $10^{-8}$  až  $10^{-6}$  s. Během tohoto intenzivního neutronového bombardování vznikají izotopy uranu s vysokým přebytkem neutronů. Tato nestabilní jádra se násobnou emisí částic  $\beta^-$  stabilizují za vzniku izotopů s dlouhým poločasem přeměny
- Bombardování těžkých prvků urychlenými ionty



# Záchyt neutronů s následnou přeměnou $\beta^-$

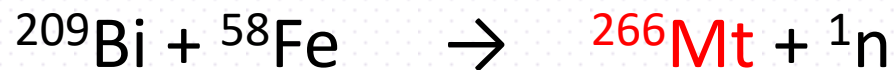
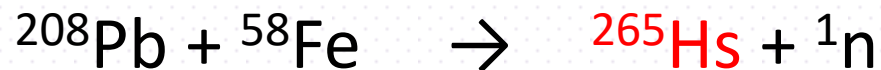
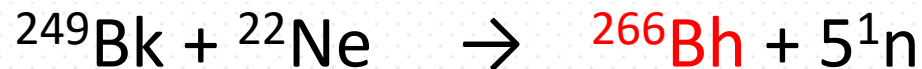
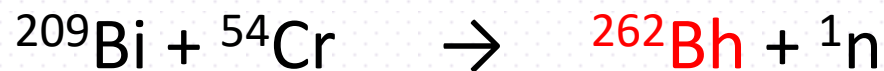
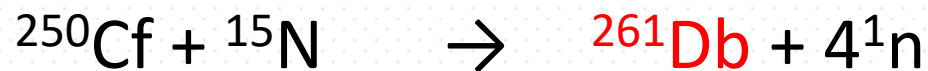
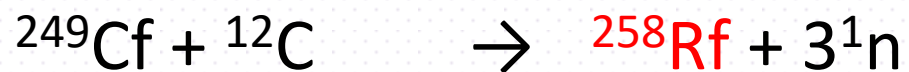
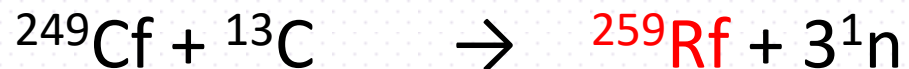
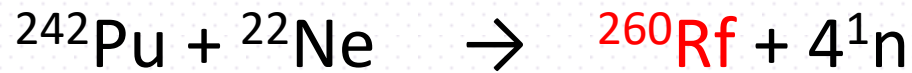


Vznik transuranových prvků postupnými záchyty neutronů a přeměnami

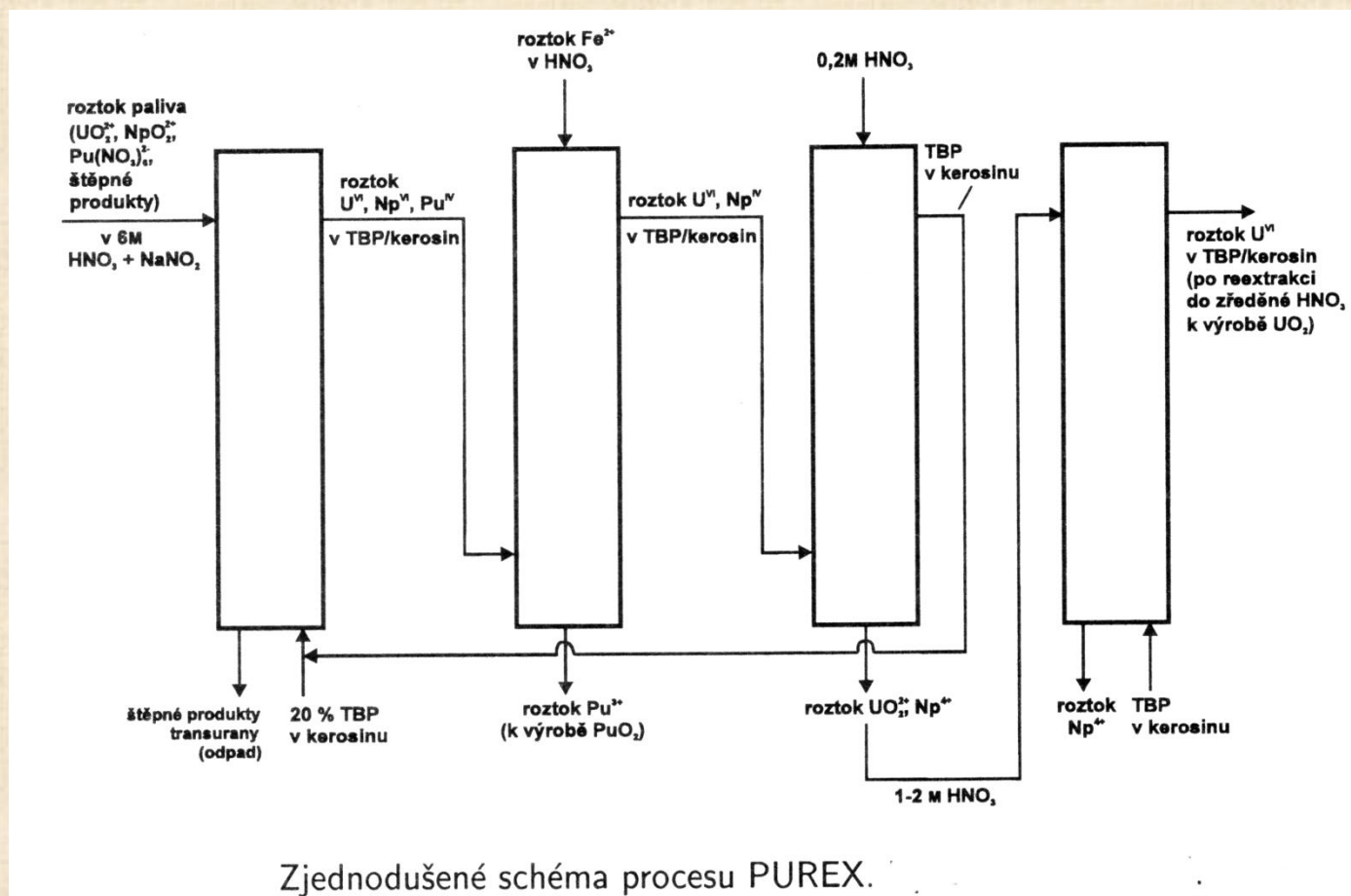
## Jaderné reakce (bombardování) s kladnými projektily

- ❑ **Bombardováním** lehkými částicemi (deuterony,  $\alpha$  částice) získáme prvky s atomovým číslem vyšším o jednu až dvě jednotky,
- ❑ Pokud ale použijeme těžší ionty, **např.  $^{12}\text{C}$  nebo  $^{16}\text{O}$**  můžeme získat prvky s protonovým číslem vyšším o šest až deset jednotek oproti výchozímu jádru.

**Příprava nových prvků  
bombardováním  
kladnými ionty**

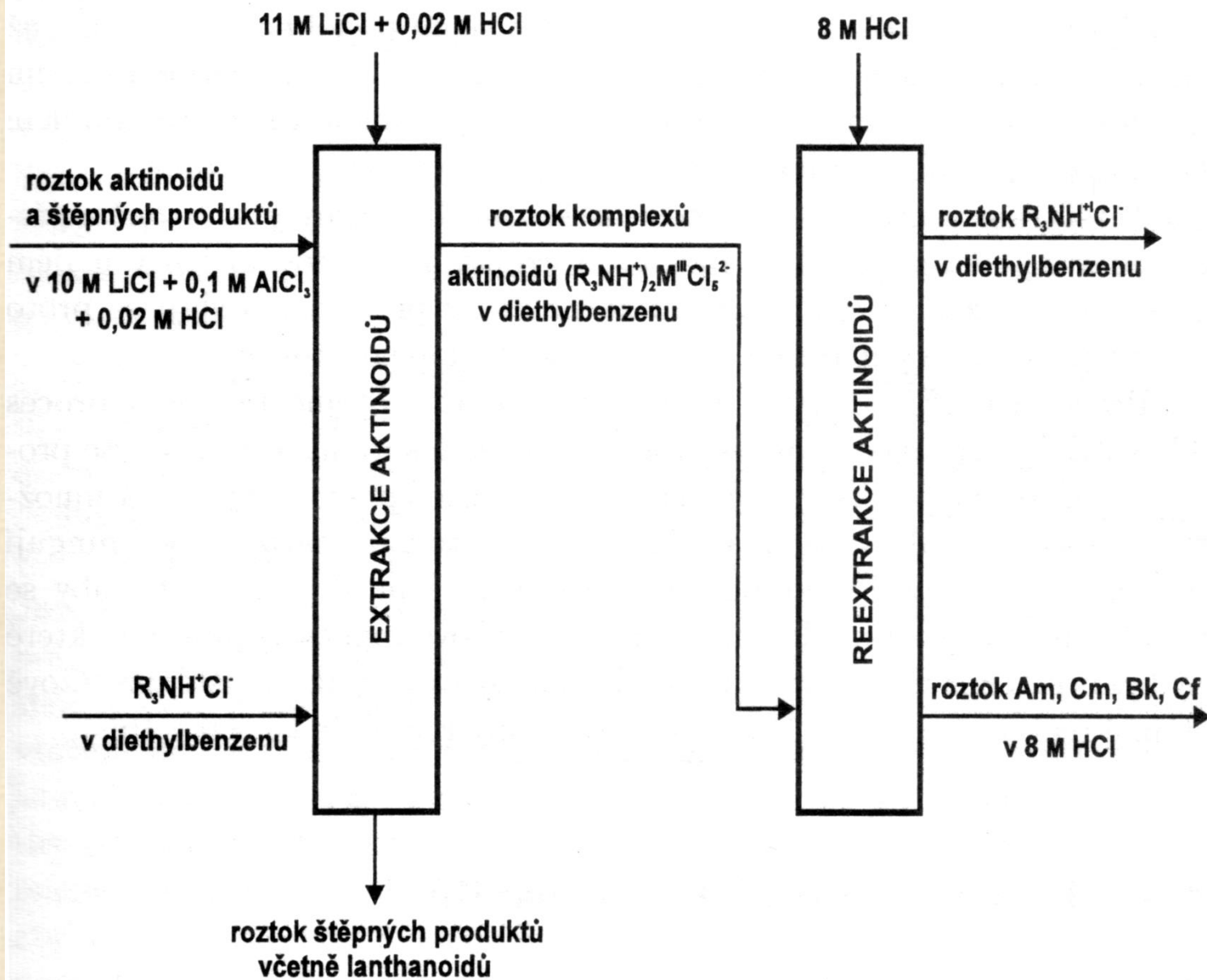


# Získávání plutonia při přepracování použitého jaderného paliva



- využívá se rozdílů v redoxním chování U, Np a Pu
- extrakce se provádí TBP (tri n-butylofosfát) v kerosinu
- nutno dbát na to, aby se nenahromadilo někde kritické množství Pu (pro nasycený vodný roztok je to cca 500 g Pu)

# Separace těžších transuranů TRAMEX procesem



Zjednodušené schéma procesu TRAMEX.