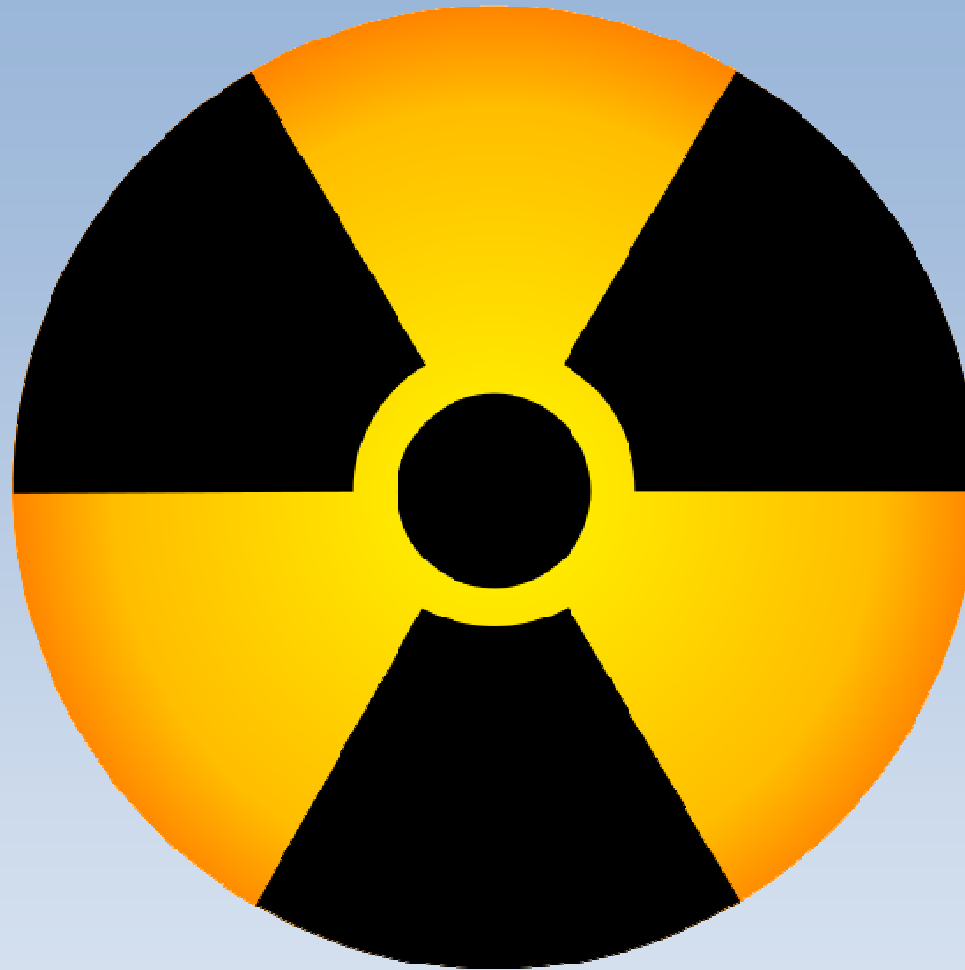
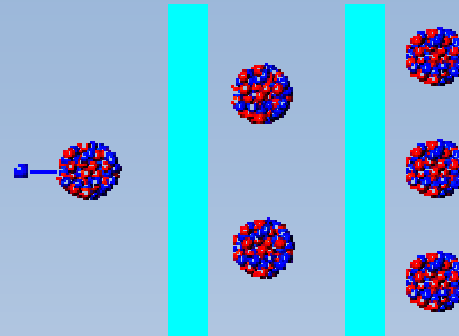
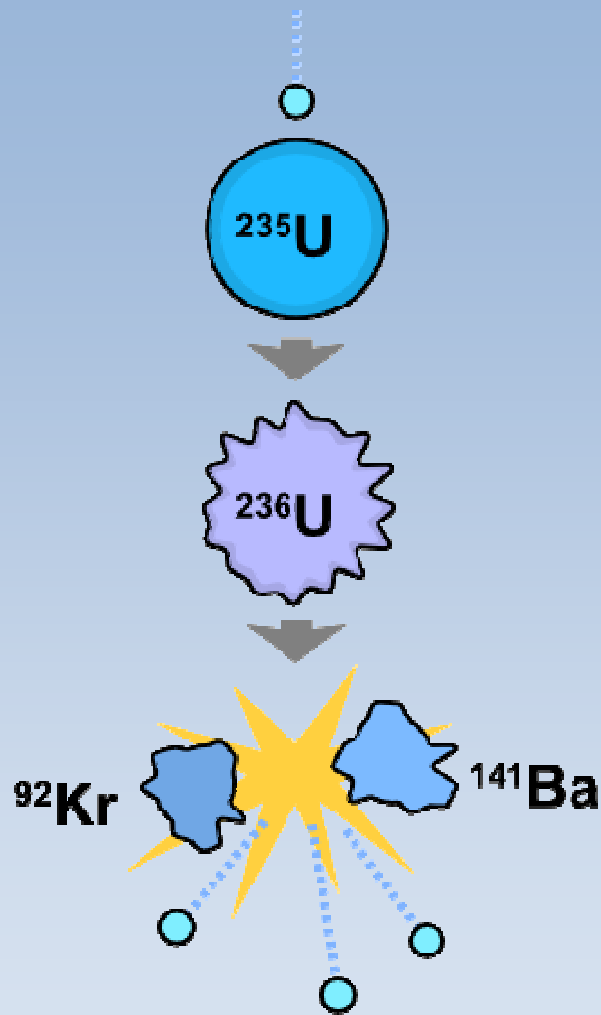


Recyklace jaderného paliva a nové druhy JP

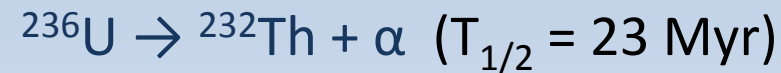


Mgr. Jiří Křivohlávek

Reakce probíhající v běžných jaderných elektrárnách



Neexcitované jádro ^{236}U se rozpadá:



Největší problémy současných jaderných elektráren

1. Obohacování U o ^{235}U z 0,7 % na cca 5 %
2. Malé množství vysoce aktivního odpadu (uhelné elektrárny velké množství nízkoaktivního odpadu)

Ad 1

Ruda se louží kyselinou dusičnou:



Dusičnan uranylu se poté převádí na uhličitan uranylo-sodný:



Dále se připraví chlorid uranylu
a provádí se čištění na iontoměničích apod.

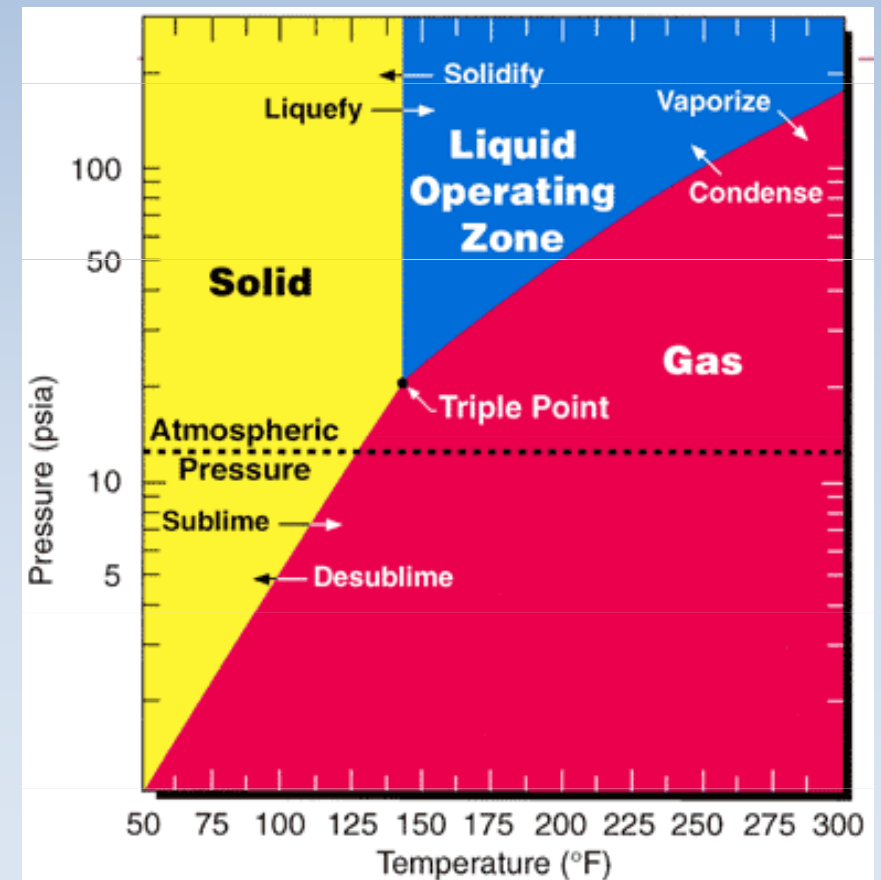
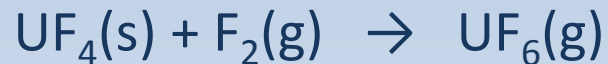


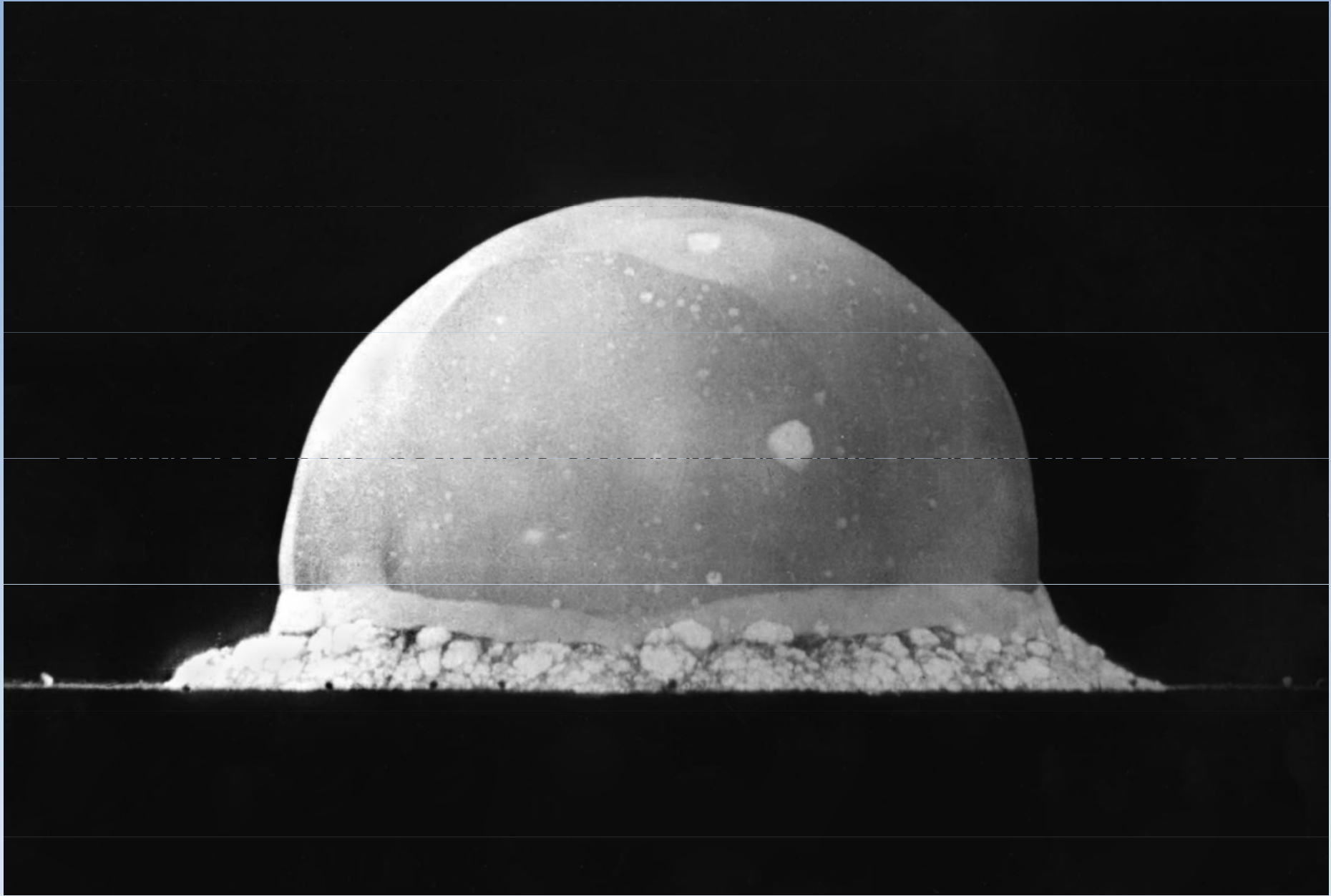
Vyčištěný chlorid uranylu se poté převede na finální prodejní produkt, který je evidován a sledován MAAE.



Vlastní obohacování:

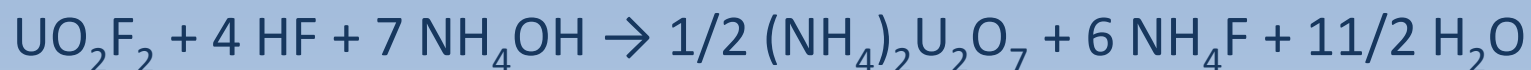
Diuranan amonný se tepelně rozloží na oxid, ze kterého se postupně připraví fluorid uranový.





The Trinity explosion, 0.016 seconds after detonation. The fireball is about 200 meters wide.

Po separaci izotopů se nakonec přes nerozpustný diuranan amonný připraví oxid uraničitý – palivo do reaktorů.



Ad 2

Původ radioaktivních odpadů:

- těžba a zpracování uranových rud
- výroba jaderného paliva
- provoz jaderných reaktorů a elektráren
- přepracovávání vyhořelého jaderného paliva
- likvidaci jaderných elektráren

Dělení odpadů:

- nízko aktivní

krátkodobé
dlouhodobé

- středně aktivní

krátkodobé
dlouhodobé

- vysoce aktivní (2 kW/m³)



- iontoměniče

- filtry

- materiály z oprav a údržby

- odpad z prádelen pracích oděvů

- zamořené oděvy

- dekontaminační materiál

- vyhořelé palivo

- přepracovávání vyhořelého paliva

(1% hmotnosti všech odpadů
ale 90% aktivity odpadů)

Úprava odpadů:

Zmenšení objemu a převod do stabilních nerozpustných forem.

- cementování (mísení s cementem)
- bitumenace (mísení s bitumenem – asfaltová živice)
- vitrifikace (vysušení a vmísení do skloviny)

Ukládání odpadů:

➤ Nízko a středně aktivní odpady

- povrchové či mělké podpovrchové úložiště
- monitorování
- nepřístupnost po dobu 100 let

➤ Vysoko aktivní odpady

- mezisklad (mokrý či suchý)
- hlubinné úložiště
 - do dolů
 - pod hladinu (v roce 1972 zakázáno)

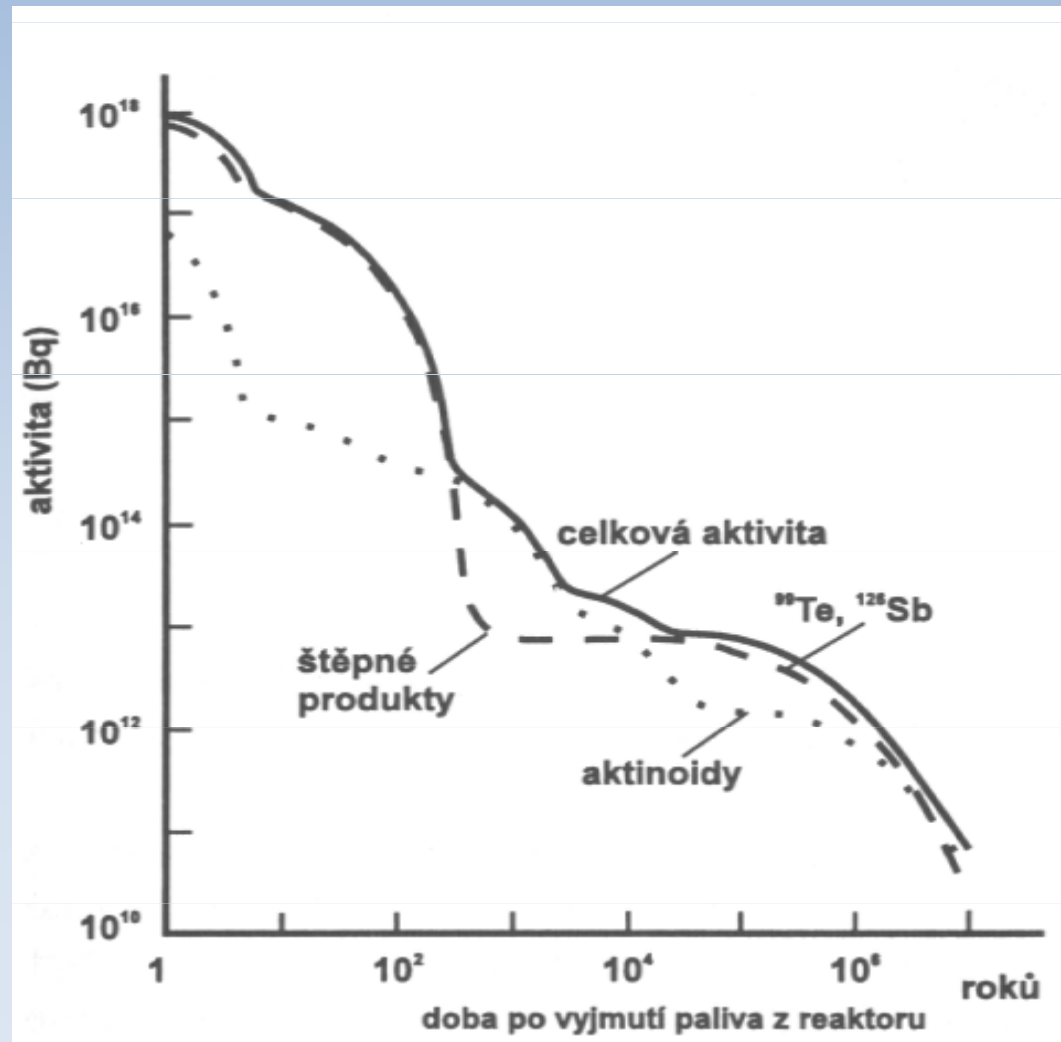
Kontejnery CASTOR (Cask for storage and transport of radioactive material):

- litinová válcová nádoba 4,1 m vysoká, průměr 2,7 m, tloušťka 37 cm
- hmotnost 131 t
- trojité víko plněné heliem
- žebrovaný povrch



Změna aktivity vyhořelého paliva z časem:

- 40 let v meziskladu - ^{90}Sr , ^{137}Cs a transurany
- 1000 let - ^{243}Am , ^{240}Pu , ^{239}Pu a ^{99}Tc
- $10^5 - 10^6$ let - ^{237}Np ($T_{1/2} = 2,1$ Myr) a produkty jeho přeměny



Recyklace vyhořelého jaderného paliva

Používají se především extrakční metody.

PUREX (*Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction*)

- extrakce U a Pu z vodné do organické fáze
- nejrozšířenější proces v průmyslu v současnosti
- získává se tak i Pu pro zbraně

UREX (*URanium EXtraction*)

- zmenšení objemu vyhořelého jaderného
- modifikace PUREXu, Pu se neextrahuje

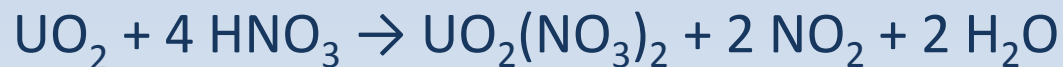
TRUEX (*TRansUranic EXtraction*)

- získává se Am a Cm
- snížení alfa aktivity odpadu, odstranění nejaktivnější části odpadu
- na rozdíl od PUREXu a UREXu se nejedná o extrakční proces

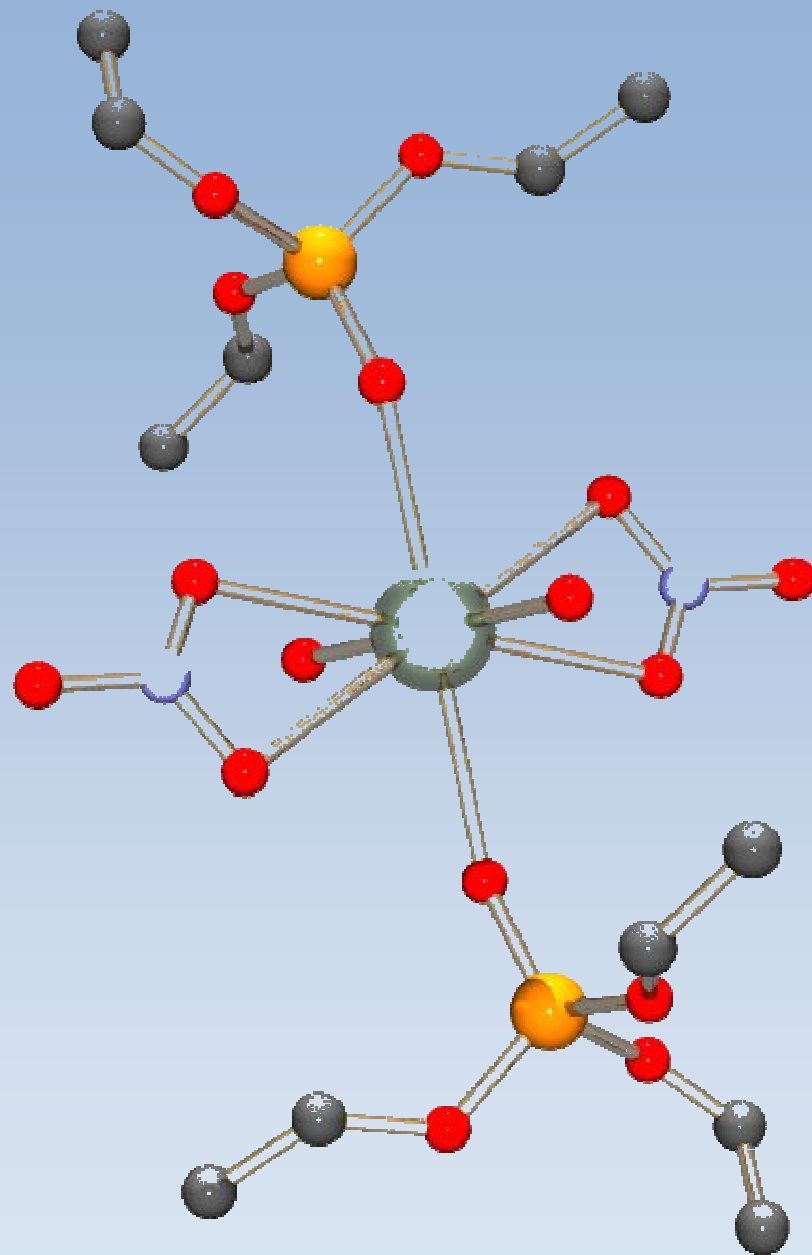
DIAMEX, SANEX, UNEX – vyvinutý v Rusku a ČR.

ad PUREX

- rozpouštění v HNO₃ (7 M)



- odfiltrování jemných nerozpuštěných částic
- extrakce do 30% TBP (tributylfosfát v petroleji)
- extrahuje se U a Pu
- štěpné produkty zůstávají v HNO₃

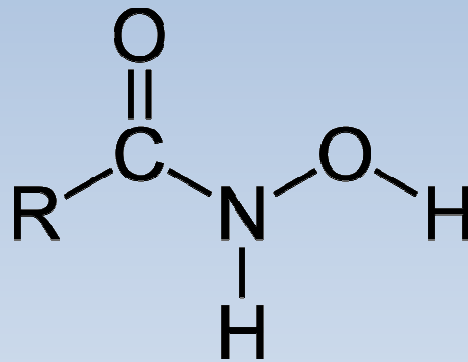


J.H. Burns, *Inorganic Chemistry*, 1983, 22, 1174

- následuje několik extrakcí za sebou
- radiolýzou vzniká dibutylhydrogenfosfát (nižší efektivita extrakce)
- je efektivní použít iontoměniče
- reextrakce do 0,2 M HNO₃, izolace, tepelný rozklad, redukce na UO₂ / PuO₂

ad UREX

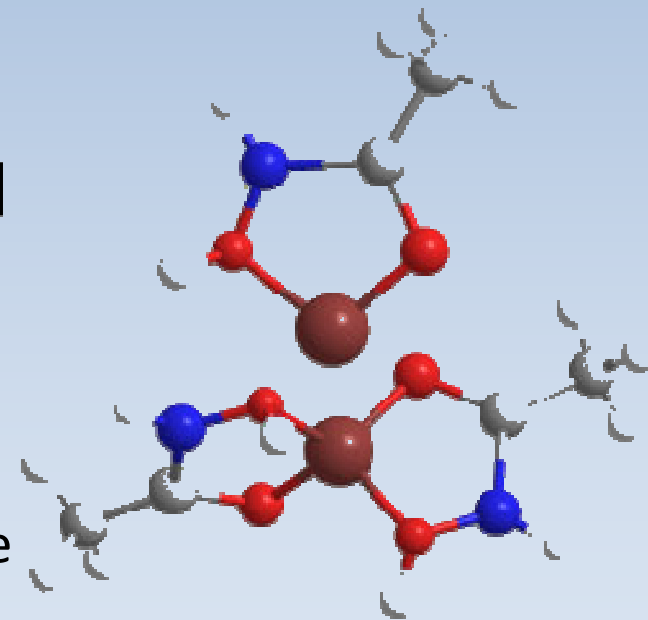
přídavek AHA (k. acetylhydroxamové, či k. fenyhydroxamové)



$$\beta_{\text{U(VI)}} < \beta_{\text{U(IV)}} < \beta_{\text{Np(IV)}} < \beta_{\text{Pu(IV)}}$$

$$\beta_{\text{Pu(IV)}} / \beta_{\text{U(VI)}} = 10^4$$

silně se tedy sníží extrakce Pu do organické fáze



Starší postup separace Pu










- po extrakci do TBP redukce Pu^{IV} na Pu^{III} pomocí Fe(SO₃NH₂)₂
- oxidace na Pu^{IV} a vysrážení jako Pu(C₂O₄)₂ · 6 H₂O
- tepelným rozkladem vznik PuO₂














Další starší metody

Separace těkavých fluoridů

- převedení na fluoridy fluorem a následná destilace
- problém TcF₆ (b. p. 55,3 °C) a UF₆ (b. p. 56,5 °C)
- selektivní redukce fluoridů

Obdoba separace těkavých chloridů.

Country	Reprocessing site	Fuel type	Procedure	Reprocessing capacity tU/yr	Operating period
Belgium 	Mol	LWR, MTR (Material test reactor)		80	1966-1974
Germany 	Karlsruhe, WAK	LWR		35	1971-1990
France 	Marcoule, UP 1	Military		1200	1958-1997
France 	Marcoule, CEA APM	FBR	PUREX DIAMEX SANEX	6	1988
France 	La Hague, UP 2	LWR	PUREX	900	1967-1974
France 	La Hague, UP 2- 400	LWR	PUREX	400	1976-1990
France 	La Hague, UP 2- 800	LWR	PUREX	800	1990
France 	La Hague, UP 3	LWR	PUREX	800	1990
UK 	Windscale	Magnox		1 000	1956-1962

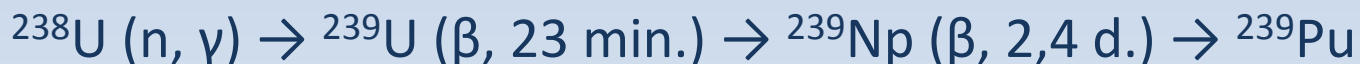
UK		Sellafield, B205	Magnox	PUREX	1,500	1964
UK		Dounreay	FBR		8	1980
UK		THORP	LWR	PUREX	1,200	1990
Italy		Rotondella	Thorium		5	1968 (shutdown)
India		Kalpakkam	Military		100	1998
India		Trombay	Military	PUREX	60	1965
India		Tarapur	CANDU		100	1982
Japan		Tokaimura	LWR		210	1977
Japan		Rokkasho	LWR		800	2005
Russia		Mayak Plant B	Military		400	1948-196?
Russia		Mayak Plant BB, RT-1	LWR	PUREX + Np separation	400	1978
Russia		Krasnojarsk, RT-2	WWER		1,500	under construction
USA, NY		West Valley	LWR		300	1966-1972

Množivé reaktory a nové druhy jaderného paliva

- vyrobí více štěpitelného paliva, než sám spotřebuje
- uvolní se 50 – 60 x více energie
- spaluje mnohem dostupnější ^{238}U a ^{232}Th

RN	^{232}Th	^{235}U	^{238}U
$T_{1/2}$ [Gyr]	13,9	0,7	4,5
Množství [%]	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$ (0,7 %)	$3 \cdot 10^{-4}$ (99,3 %)

Při vzniku Země ^{235}U 23 % a ^{238}U 77 %.



Masové použití výhledově za cca 20 - 50 let.

Výhody proti klasickým reaktorům:

- ^{233}U má větší účinný průřez pro reakci (n, f) než ^{235}U a ^{239}Pu
- o 50 % méně radioaktivního odpadu (o nižší aktivitě)
- ^{232}Th 3x větší zastoupení v zemské kůře
- MR má velký význam jako „žrout“ jaderného odpadu

Množivý poměr:

- množství nových štěpitelných atomů / počet rozštěpených atomů
- v současnosti od 0,7 – 1,2 (teoreticky až 1,8)

Typy množivých reaktorů:

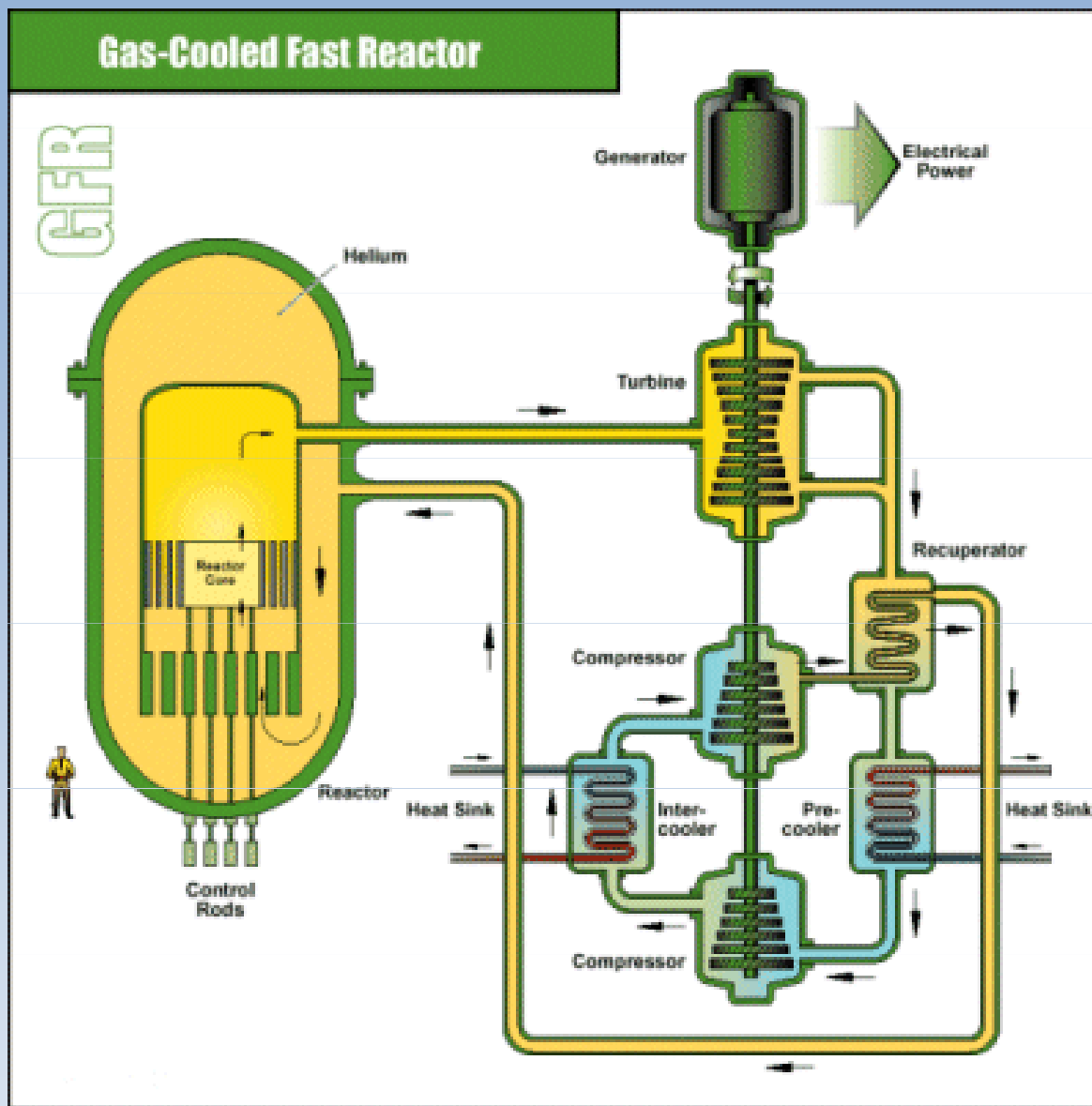
- FBR (fast breeder reactor)
- TBR (termal breeder reactor)

ad FBR:

- základem je palivo z Pu
- dále se doplňuje jen palivo s přírodního či dokonce ochuzeného U
- případně i Th

Typy FBR:

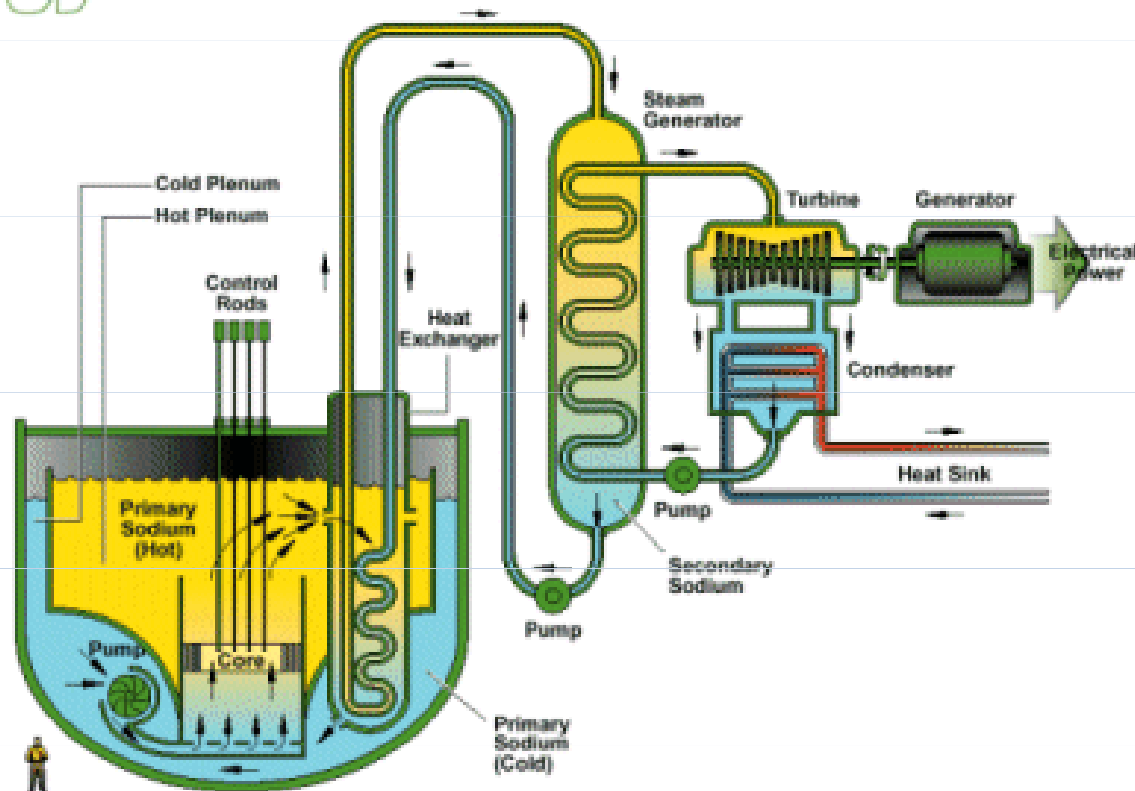
- GFR (gas-cooled fast reactor)
- SFR (sodium-cooled fast reactor)
- LFR (lead-cooled fast reactor)



CO₂ či He; neabsorbují n; teploty (1600 °C i výše); malá tepelná kapacita He
 THTR-300 Německo, Peach Bottom a Fort St. Vrain US, HTTR Japonsko, HTR-10 Čína

Sodium-Cooled-Fast Reactor

SFR



SFR-MOX (20% transuranic ox.
and 80% uranium oxide);
pracovní teplota 550 °C;
obložení reaktoru s MgO;
běžný výkon 500 – 1500 MW

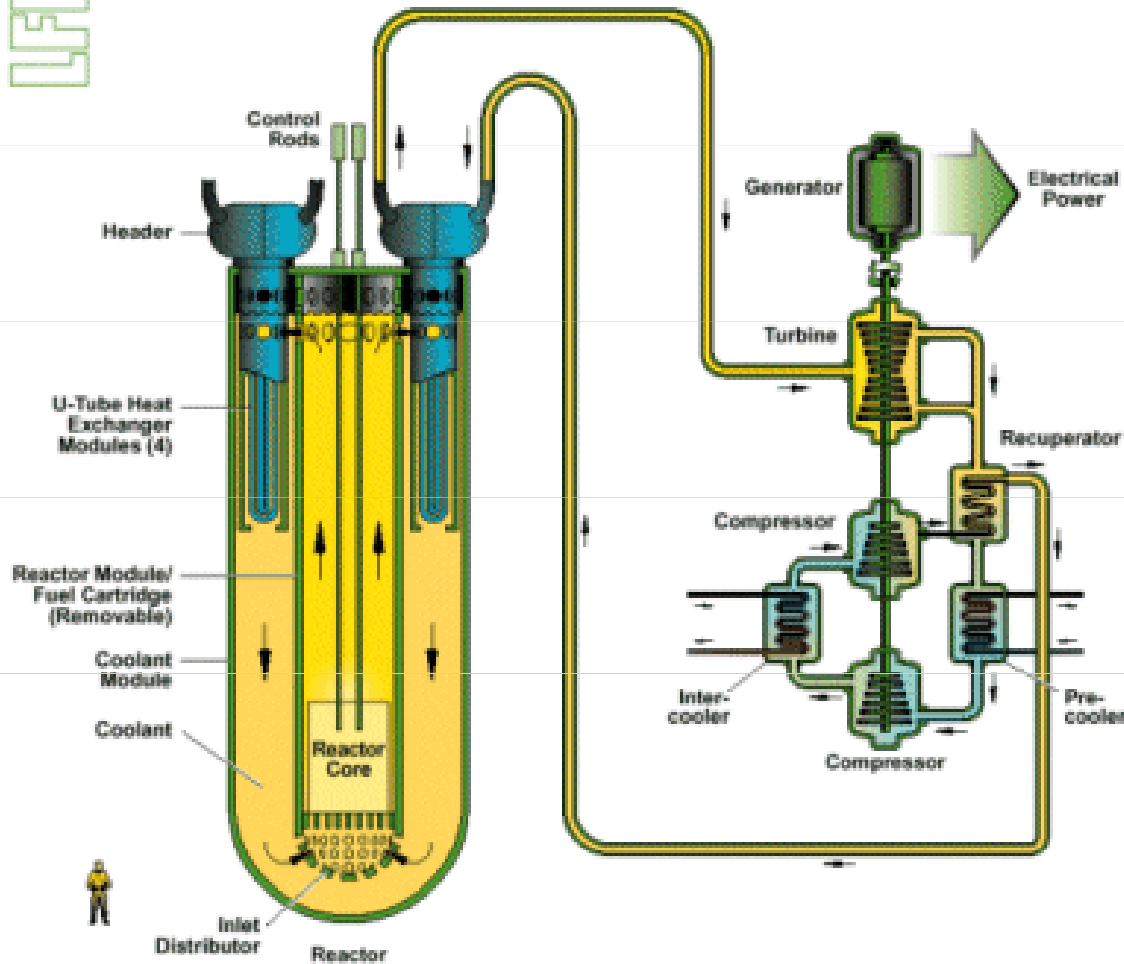
Je navržen na zpracování vysokoaktivního odpadu, plutonia a dalších aktinoidů.

S. Bays, M. Pope, B. Forget, R. Ferrer, "Transmutation Target Compositions in Heterogeneous Sodium Fast Reactor Geometries", INL/EXT-07-13643 Rev. 1, **2008**

M. J. Lineberry and T. R. Allen, Argonne National Laboratory, "The Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)"

Lead-Cooled Fast Reactor

LFR



chladio Pb či eutektikum Pb-Bi
přirozená cirkulace chladiwa
palivo kovové či nitridy:
(U_2N_3 či nitridy aktinoidů)
výkon 300 – 1200 MW
pracovní teplota 550 °C
výhledově i 800 °C
OK-550, BM-40A Rusko

ad TBR:

- základem je palivo z obohaceného U či MOX
- MOX (mixed oxid fuel – směs oxidů Pu a U (ochuzený i přírodní)
- dále už se jen přidává Th

Typy TBR:

- AHWR (Advanced Heavy Water Reactor)
- LFR (Liquid Fluoride Reactor)

AHWR:

- vývoj především v Indii (velké zásoby Th)
- palivo - $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ moderátor amorfni C a těžká voda

LFR:

- primární chladivo, moderátor a palivo roztavená sůl (UF_4)
- palivo se stává kritickým v jádře s uhlíkovým moderátorem
- lepší tepelná výměna - zmenšení aktivního jádra
- snadná separace štěpných produktů

Material	Total Neutron Capture Relative to Graphite (per unit volume)	Moderating Ratio
Heavy Water	0.2	11,449
Light Water	75	246
Graphite	1	863
Sodium	47	2
UO ₂	3,583	0.1
2LiF-BeF ₂	8	60
LiF-BeF ₂ -ZrF ₄ (64.5-30.5-5)	8	54
NaF-BeF ₂ (57-43)	28	15
LiF-NaF-BeF ₂ (31-31-38)	20	22
LiF-ZrF ₄ (51-49)	9	29
NaF-ZrF ₄ (59.5-40.5)	24	10
LiF-NaF-ZrF ₄ (26-37-37)	20	13
KF-ZrF ₄ (58-42)	67	3
RbF-ZrF ₄ (58-42)	14	13
LiF-KF (50-50)	97	2
LiF-RbF (44-56)	19	9
LiF-NaF-KF (46.5-11.5-42)	90	2
LiF-NaF-RbF (42-6-52)	20	8

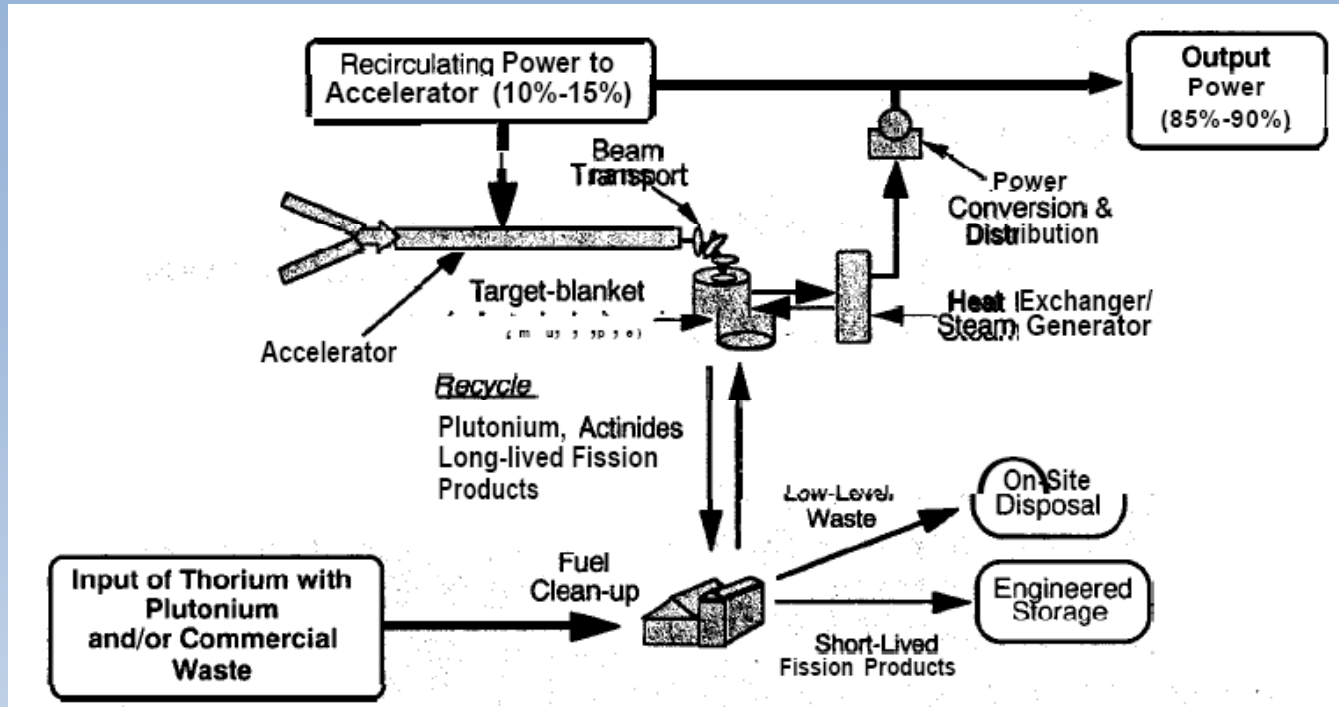
Další typy množivých reaktorů:

ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies)

- neutrony se generují pomocí urychlených p (0,8 - 1,5 GeV)
- na jeden p připadá při tříštění terče až 50 n
- podkritické množství paliva (vyloučena možnost havárie)
- spaluje Th, Pu – pocházející např. ze zbraní
- spaluje aktuální jaderný odpad (nový odpad vymře za cca 100 let)

aktuální problémy

- chlazení terčíku
- přechod protonů z vakua urychlovače do horkého terčíku
- vyšší investiční náročnost



Činnost

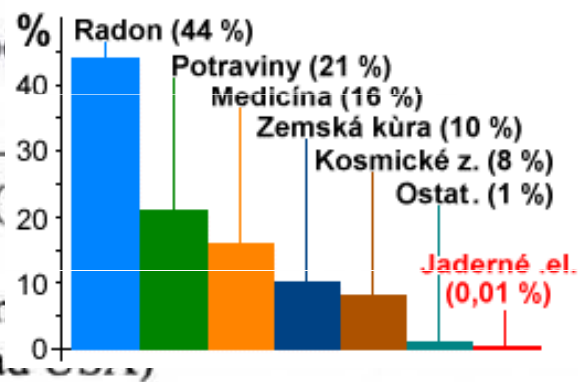
Počet úmrtí
na 1 milion
obyvatel za rok

Dobrovolná rizika

Kouření (20 cigaret denně)	5 000
Pití (jedna láhev vína denně)	75
Jízda na motocyklu	20 000
Automobilové závody	1 200
Horolezectví	140
Řízení automobilu	170
Používání antikoncepce	20

Nedobrovolná rizika

Přejetí automobilem (Povodně (USA))	60
Zemětřesení (Kalifornie)	2,2
Tornáda (střední západ USA)	1,7
Bouře (USA)	2,2
Přírodní katastrofy celkem	0,8
Zřícení letadla (Velká Británie)	1
Výbuch tlakových nádob (USA)	0,02
Únik z jaderných elektráren (na hranici pozemku elektrárny -USA)	0,05
Emise oxidu siřičitého	0,1
Protržení hrází (Holandsko)	3
Chřipka	0,1
	200



Tabulka 1: Dobrovolná a vnucená rizika

Děkuji Vám za pozornost.