

Jaderná energetika (JE)

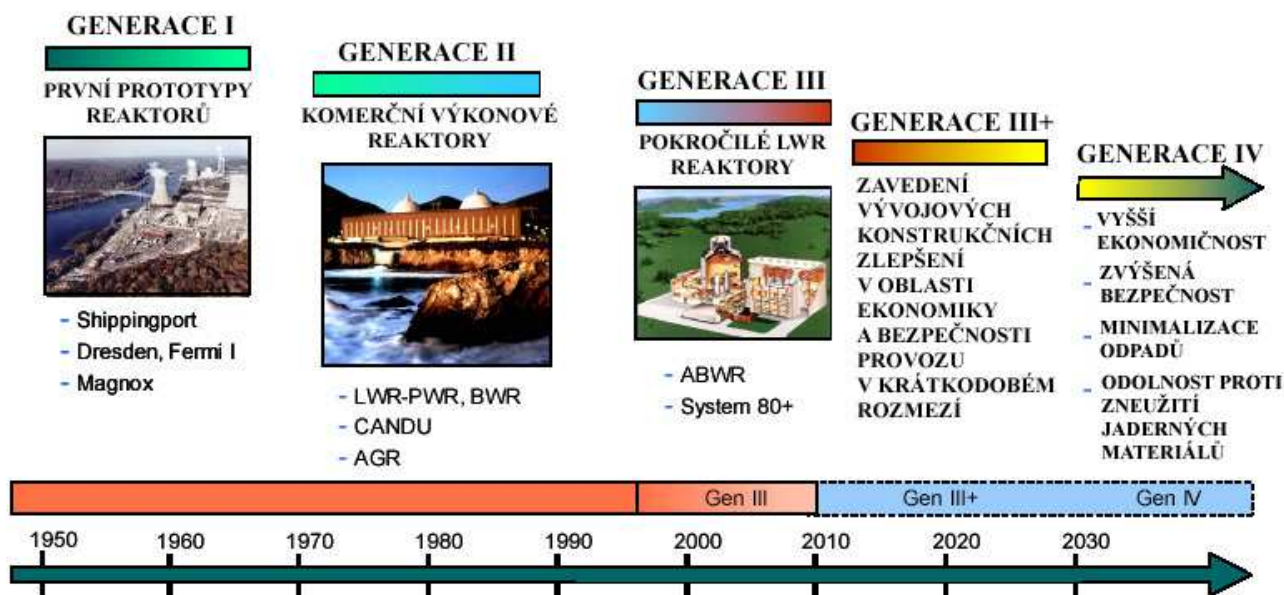
Pavel Zácha
2014-04

zdroj: Karel Katovský, FJFI ČVUT v Praze

Netradiční jaderné aplikace a budoucnost

Osnova

- Reaktory GIV.
- Transmutační systémy
- Fúzní reaktory



GIV. - cíle

- **Udržitelnost-1** - zajistit trvale udržitelnou výrobu energie, která splní požadavky na čistotu ovzduší a podpoří dostupnost systému pro delší časový horizont a efektivní využití paliva pro celosvětovou výrobu energie
- **Udržitelnost-2** - minimalizovat množství jaderného odpadu, usnadnit nakládání s odpadem a výrazně snížit potřebu dlouhodobého dozoru, a tím podstatně zlepšit ochranu obyvatel a životního prostředí
- **Ekonomika-1** - musí být cenově výhodnější (z hlediska celého životního cyklu) v porovnání s jinými energetickými zdroji
- **Ekonomika-2** - musí mít úroveň finančního rizika srovnatelnou s jinými energetickými systémy
- Provoz energetických systémů IV. Generace bude vynikat v **bezpečnosti a spolehlivosti**
- Energetické systémy IV. Generace budou mít **velice nízkou pravděpodobnost a míru poškození aktivní zóny**
- Jaderné energetické systémy IV. Generace eliminují potřebu vnějšího havarijního plánování – **není nutná evakuace**
- **Nonproliferation** - zajistí snížení rizika zcizení jaderných materiálů, snížení jejich atraktivity pro případné zneužití k výrobě jaderných zbraní a zvýšení fyzické ochrany proti teroristickým útokům
- **Výroba procesního tepla** – např. vodík

Systemy GIV. (vybrané z 94)

- Uzavřený palivový cyklus s recyklací aktinidů
 - Sodíkem chlazený rychlý reaktor - SFR
 - Olovo-vizmutem chlazený rychlý reaktor - LFR
 - Plynem chlazený rychlý reaktor - GFR
 - Tekutými solemi chlazený rychlý reaktor – MSR
- Otevřený a částečně otevřený (MOX) palivový cyklus
 - Superkritický lehkovodní reaktor - SCWR - T
 - Velmi-vysokoteplotní plynem chlazený reaktor - VHTR

Systemy GIV.

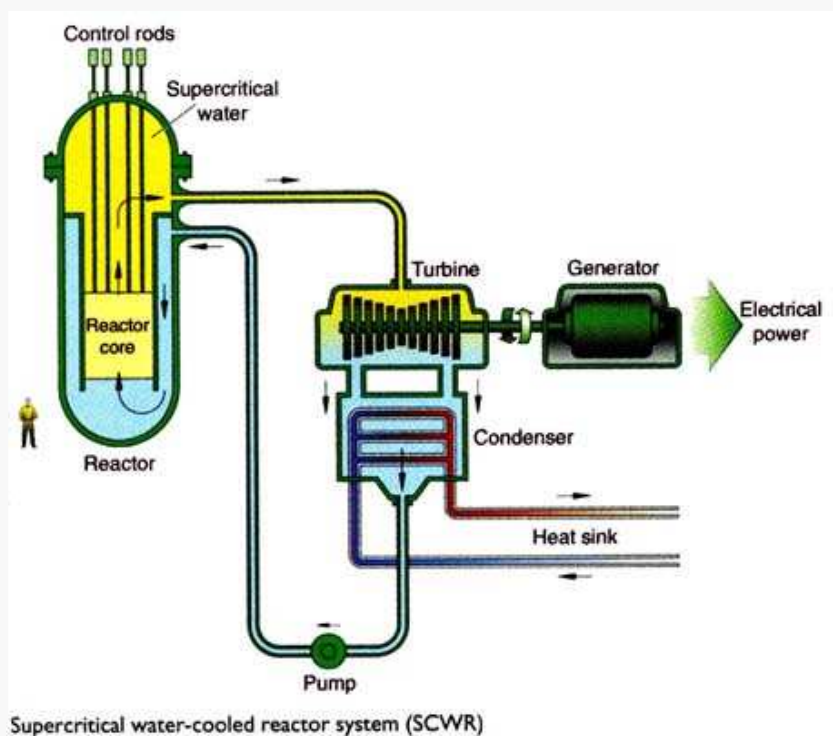
SCWR - Superkritický lehkovodní reaktor

Charakteristiky

- chladivo-H₂O při superkritických podmínkách
- výstupní teplota 500°C
- 1700 MWe
- zjednodušený sekundární systém

Výhody

- účinnost téměř 45% s vynikající ekonomikou
- tepelné nebo rychlé spektrum neutronů



Systemy GIV.

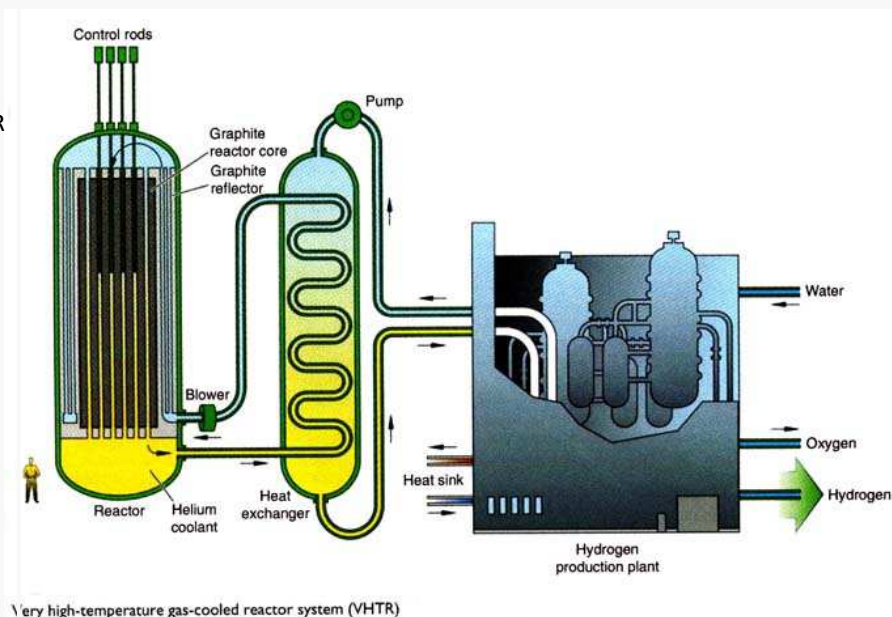
VHTR - Velmi-vysokoteplotní plynem chlazený reaktor

Charakteristiky

- chladivo He
- výstupní teplota $>1000^{\circ}\text{C}$
- 600 MWe
- grafitové bloky jako GT-MHR

Výhody

- vysoká účinnost
- výroba vodíku
- výroba procesního tepla
- vysoká úroveň pasivní bezpečnosti



Systemy GIV.

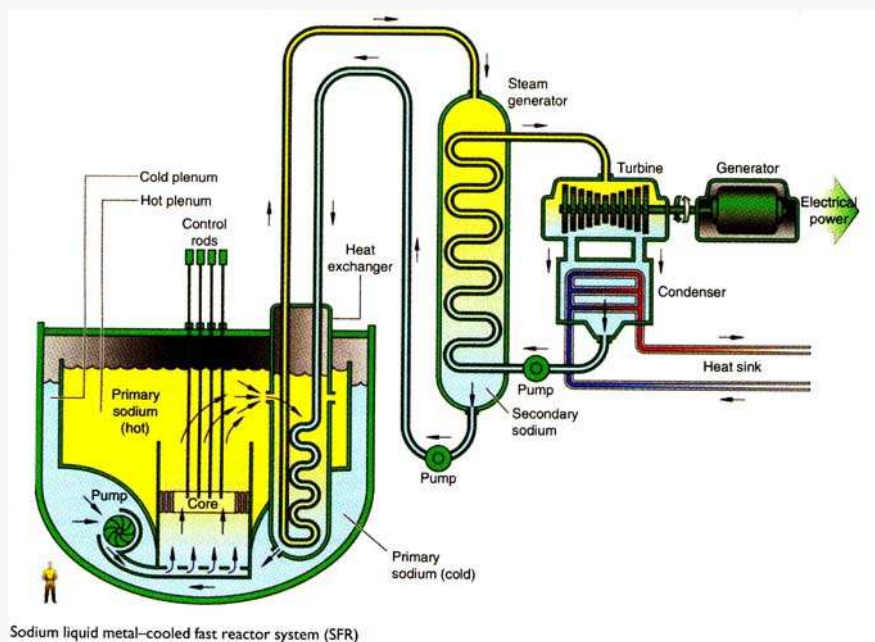
SFR - Sodíkem chlazený rychlý reaktor

Charakteristiky

- chladivo Na
- 150 až 500 MWe
- kovové palivo pyro-processing / MOX palivo s pokročilým zpracováním

Výhody

- spotřeba aktinidů z LWR



Systemy GIV.

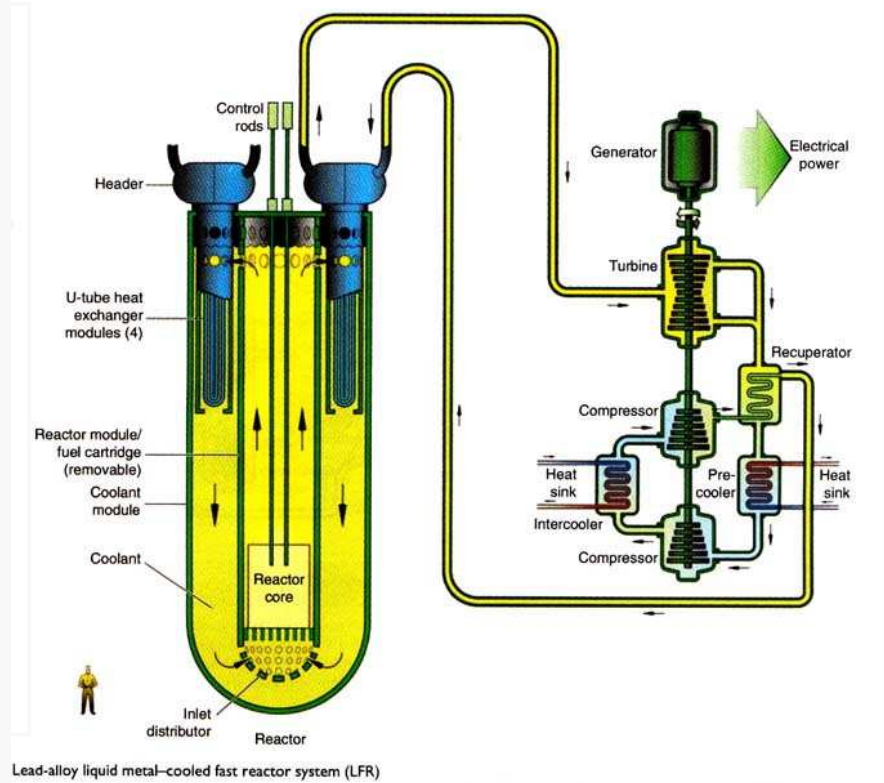
LFR - Olovo-vizmutem chlazený rychlý reaktor

Charakteristiky

- Pb nebo Pb/Bi chladivo
- výstupní teplota 540°C až 750°C
- 120-400 MWe
- 15-30 let životnost AZ

Výhody

- distribuovaná výroba el. energie
- vodík a pitná voda
- kazetová AZ, oblastní přepracování
- vysoká pasivní bezpečnost
- odolnost proti zneužití jaderných materiálů



Systemy GIV.

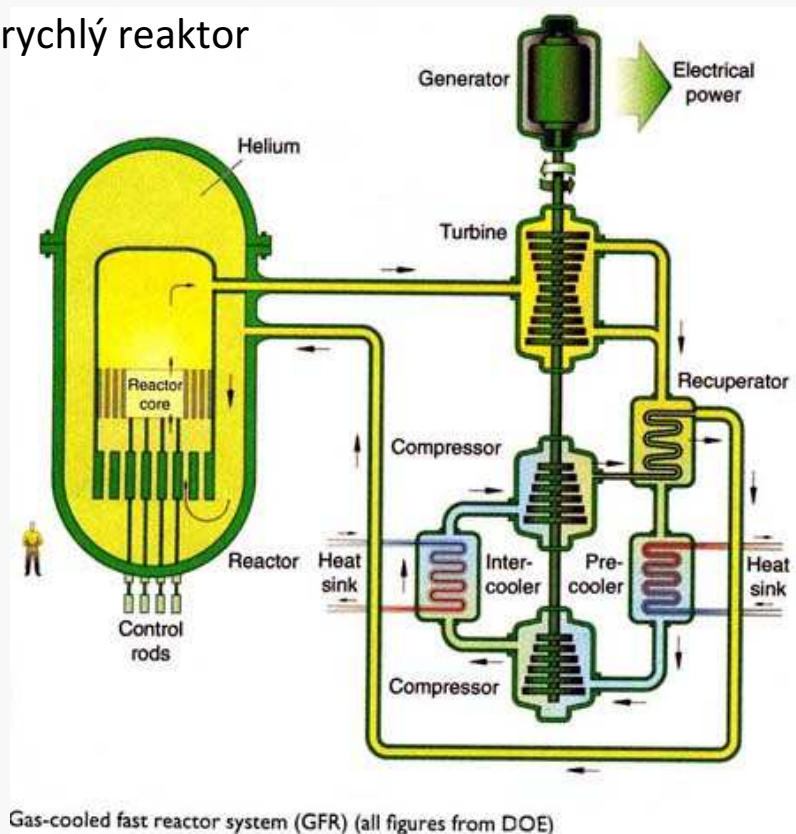
GFR - Plynem chlazený rychlý reaktor

Charakteristiky

- chladivo He (S-CO₂)
- výstupní teplota 850°C
- přímý cyklus, Brayton – účinnost 48%?
- 600 MW_{th}/288 MW_e
- několik možností paliva a konfigurací AZ

Výhody

- minimalizace odpadu a efektivní využití suroviny
- potenciál nízké kapitálové náročnosti



Systemy GIV.

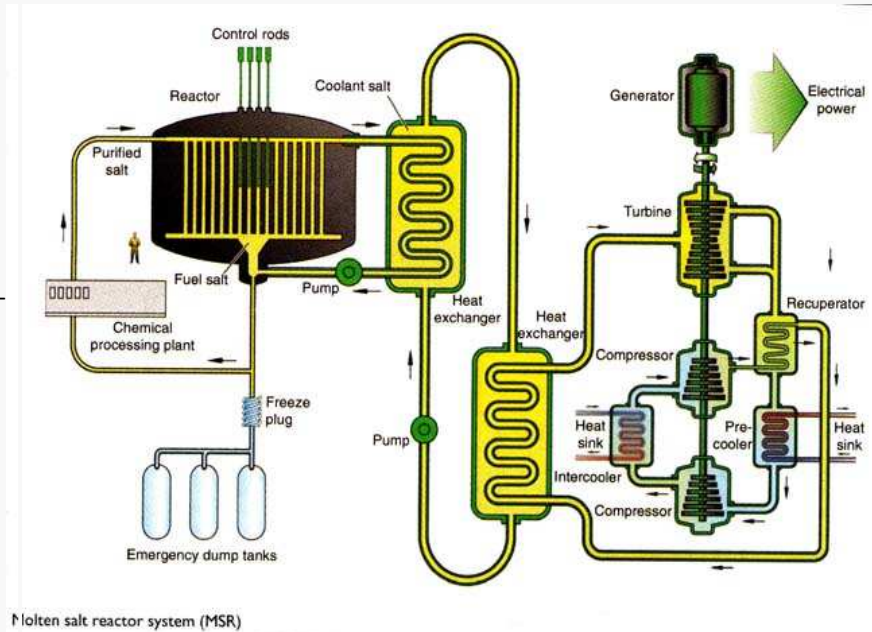
MSR - Tekutými solemi chlazený rychlý reaktor

Charakteristiky

- palivo: tekuté Li, Be, Th a U fluoridy
- výstupní teplota 700°C
- 1000 MWe
- nízký tlak (<0.5 MPa) & vysoká T (>700°C)

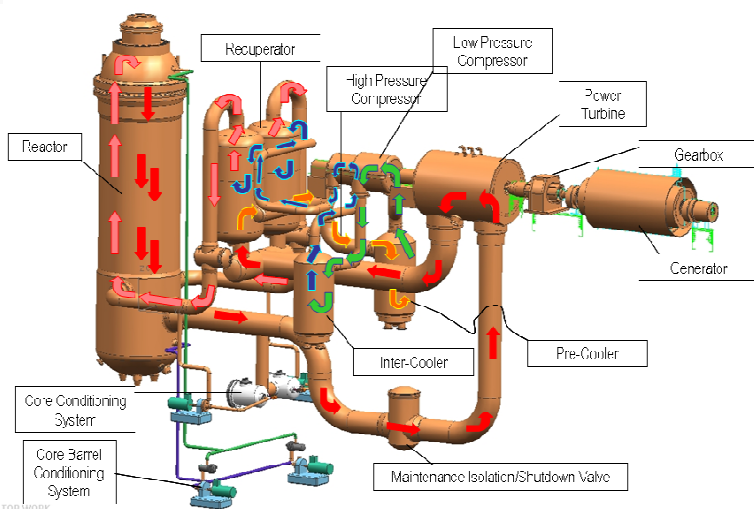
Výhody

- nízký zdrojový člen díky on-line přepracování
- minimalizace odpadu a efektivní využití suroviny

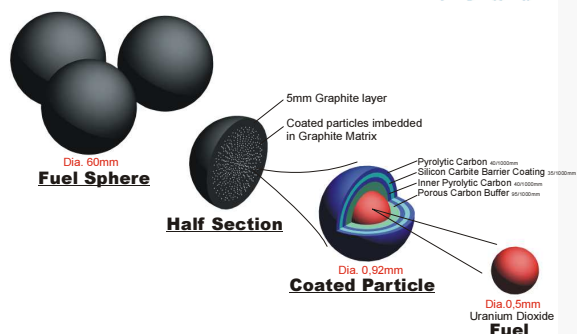


Systemy GIV.

PBMR

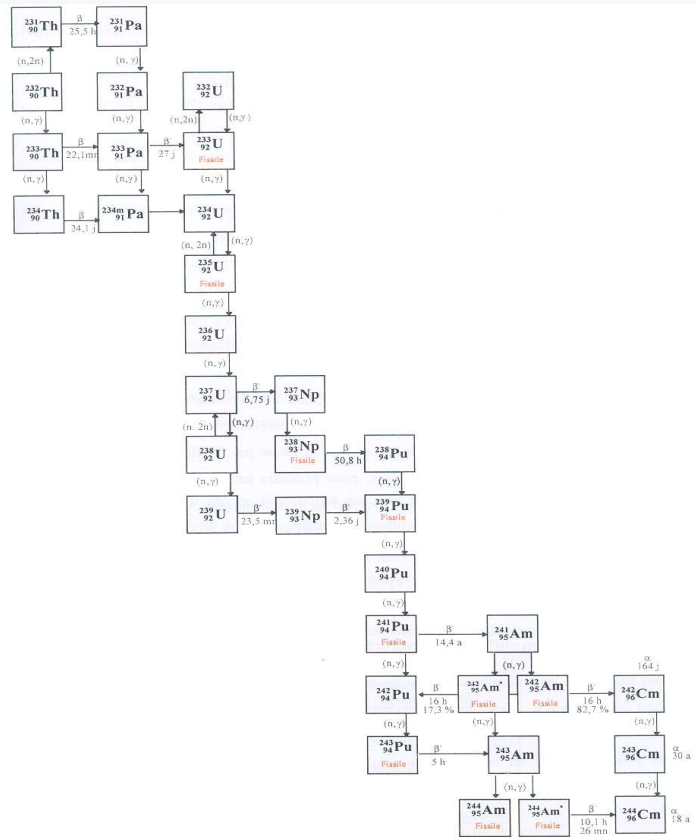


FUEL ELEMENT DESIGN FOR PBMR



Transmutory

- Kritické
 - rychlý reaktor
 - epitermální reaktor
 - s tekutými solemi
- Podkritické – ADS, hybridní systémy
 - s pevným palivem
 - s tekutými solemi



Transmutory

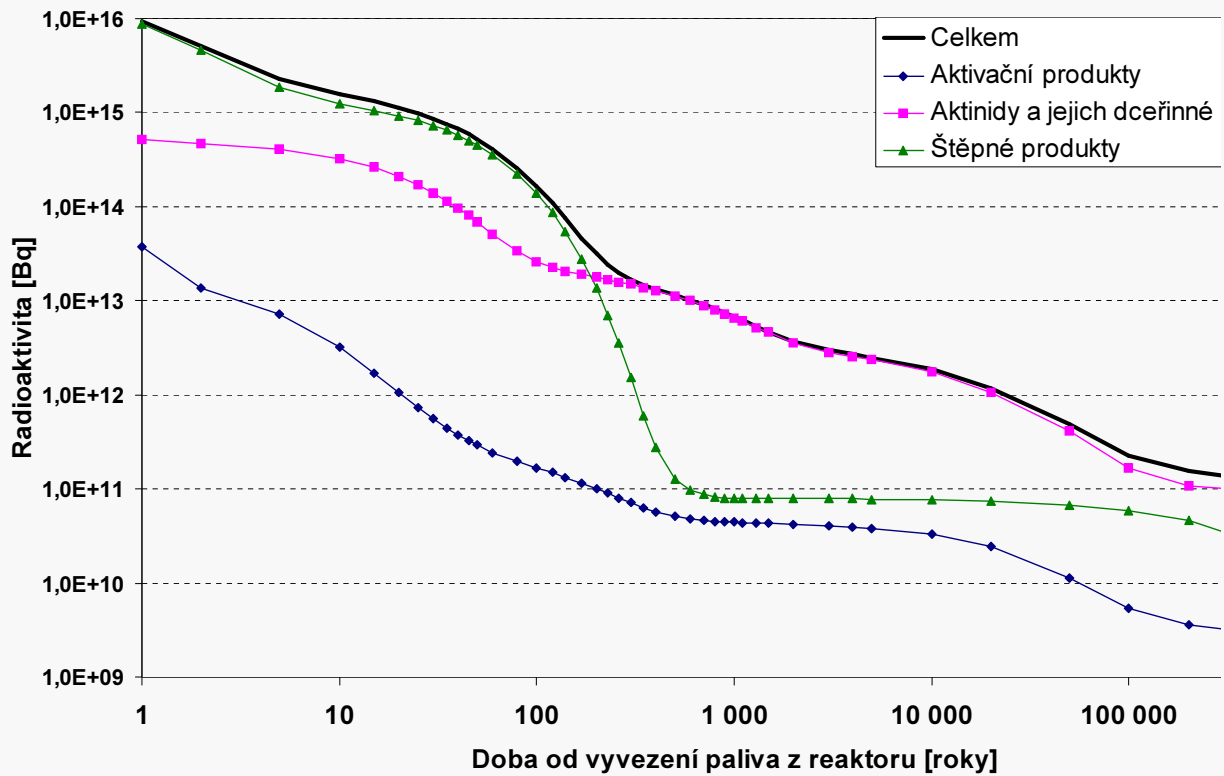
nuklid	kg/rok	poločas rozpadu [roky]	počet atomů/rok [*10 ²⁵]
²³⁸ Pu	4.52	88	1.13
²³⁹ Pu	166	2.4*10 ⁴	41.6
²⁴⁰ Pu	76.7	6.6*10 ³	19.2
²⁴¹ Pu	25.4	14.4	6.4
²⁴² Pu	15.5	3.8*10 ⁵	3.9
²³⁷ Np	14.5	2.1*10 ⁶	3.66
²⁴¹ Am	16.6	432	4.13
^{242m} Am	0.022	141	
²⁴³ Am	2.99	7.4*10 ³	0.73
²⁴³ Cm	0.011	28.5	
²⁴⁴ Cm	0.58	18.1	0.13
Celkem			81.35

Roční produkce Pu a dalších vyšších aktinidů v tlakovodních reaktorech při vyhoření 33 000 MWd/tU (po 10 letech samovolného rozpadu)

nuklid	poločas rozpadu [roky]	počet atomů/rok [*10 ²⁵]
⁷⁹ Se	6.5*10 ⁴	0.13
⁸⁵ Kr	10.7	0.28
⁹⁰ Sr	28.8	9.0
⁹³ Zr	1.5*10 ⁶	15
⁹⁹ Tc	2.1*10 ⁵	15
¹⁰⁷ Pd	6.5*10 ⁶	4.1
¹²⁶ Sn	1.0*10 ⁵	0.46
¹²⁹ I	1.6*10 ⁷	2.7
¹³⁵ Cs	3*10 ⁶	4.2
¹³⁷ Cs	30	11
¹⁵¹ Sm	90	0.46

Roční produkce štěpných produktů v tlakovodních reaktorech při vyhoření 33 000 MWd/tU (po 10 letech samovolného rozpadu)

Transmutory



Transmutory

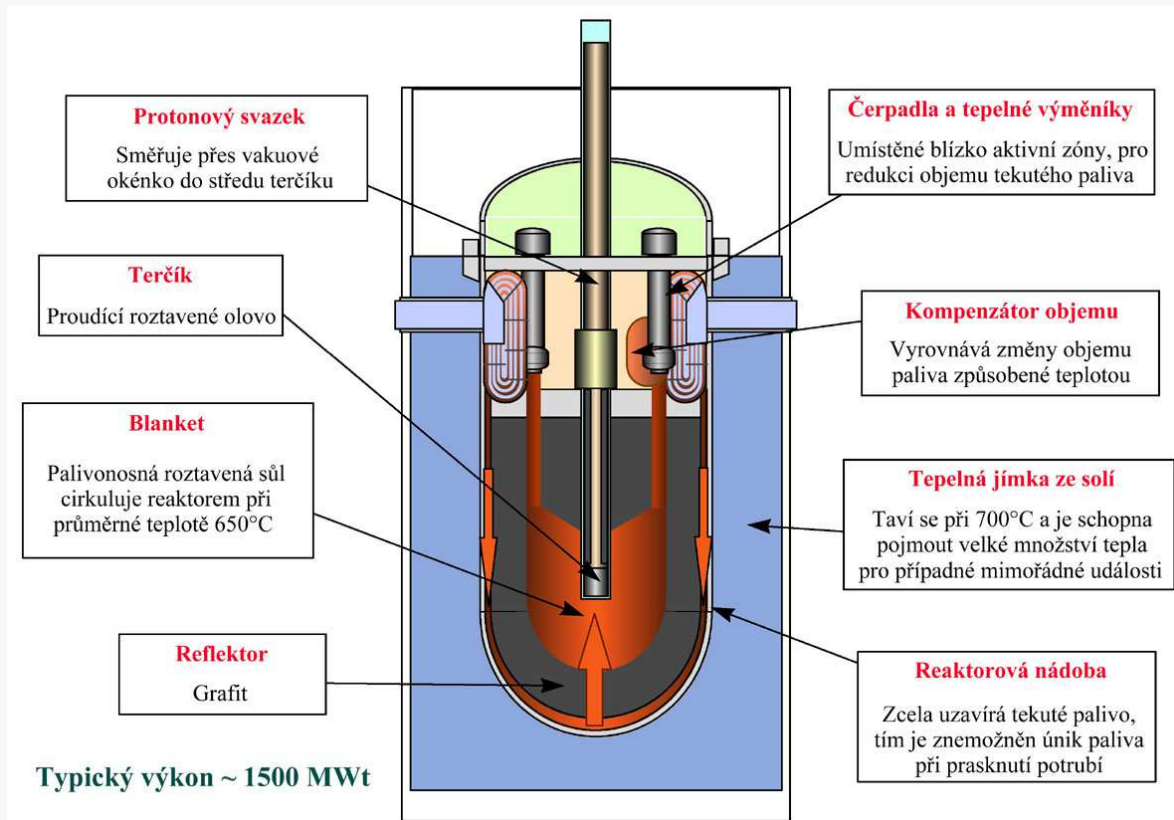
Jak transmutovat nuklidy

V jaderných reakcích vznikají → jaderné reakce je mohou přeměňovat

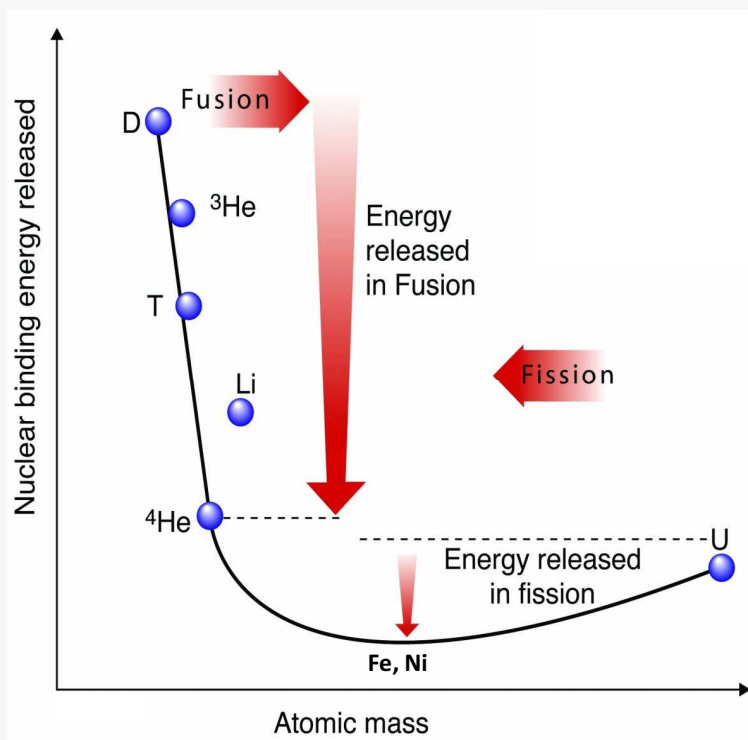
Různé typy reakcí:

1. reakce neutronů s jádry
2. reakce protonů s jádry
3. fotojaderné reakce
4. reakce s jinými částicemi a jádry
5. velmi výhodné reakce s neutrony
 1. dosažení vysoké efektivity transmutace (vysoké pravděpodobnosti reakce s neutronem) → nutnost velmi intenzivního pole neutronů 10^{20} neutronů $m^{-2}s^{-1}$ (klasický reaktor $\leq 10^{18}$ neutronů $m^{-2}s^{-1}$)
 2. vysoká závislost pravděpodobnosti reakce na energii neutronů → nutnost širokého energetického rozsahu neutronů

Transmutory



Jaderná fúze



- Slučování lehkých atomových jader ($Z \leq 28$)

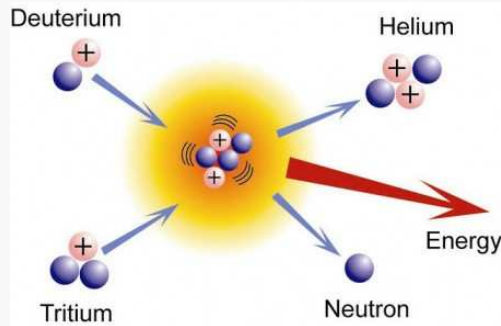
1905 *Einstein* Teorie relativity
 1920 *Edington* Fúze ve hvězdách
 1929 *Atkinson* Fúzní energie hvězd
 1934 *Rutherford* Fúze na urychlovači
 1951 *Sacharov, Spitzer*
 magnetické nádoby
 1952 *Teller* Vodíková bomba
 1957 *Lawsonovo* kritérium

Jaderná fúze

- možné řešení energetického problému

deuteron

$$E_{\text{kin}} \sim 0.02 \text{ MeV}$$



α částice - 4 MeV
(ohřev paliva)

triton

rychlý neutron - 14 MeV
(energie využitelná pro výrobu elektřiny)

Exotermní reakce! – produkty reakce mají **1000x** větší kinetickou energii než vstupní palivo

Jaderná fúze

Účinnost fúzních reakcí

Možné kombinace paliva

Deuterium-Tritium

- potřebná teplota je relativně nízká (0,1 miliardy stupňů, proto nejpravděpodobnější kombinace)

Deuterium-Helium 3

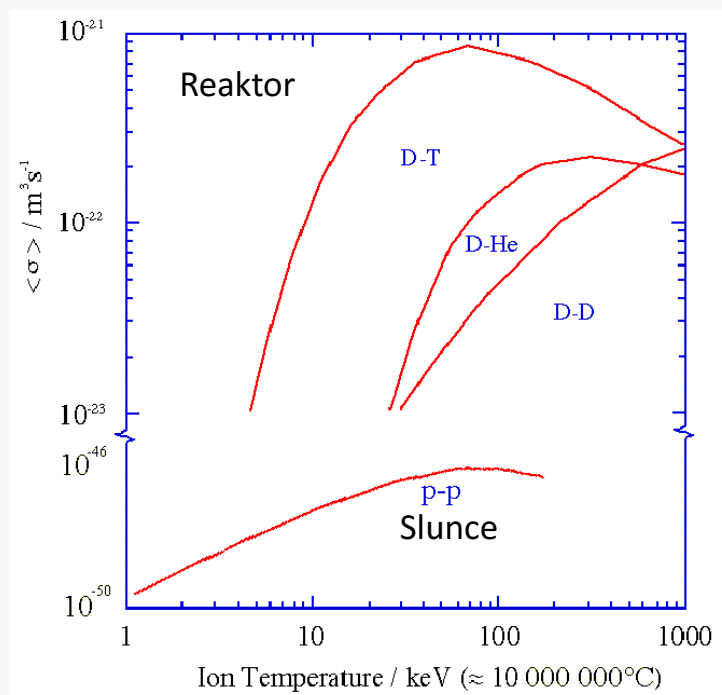
- palivo není radioaktivní, ale He3 je pouze na Měsíci

Deuterium-Deuterium

- vyžaduje vysoké teploty 1 – 10 miliard stupňů!!

Proton-Proton

- probíhá na Slunci



Jaderná fúze

Účinnost fúzních reakcí

Možné kombinace paliva

Deuterium-Tritium

- potřebná teplota je relativně nízká (0,1 miliardy stupňů, proto nejpravděpodobnější kombinace)

Deuterium-Helium 3

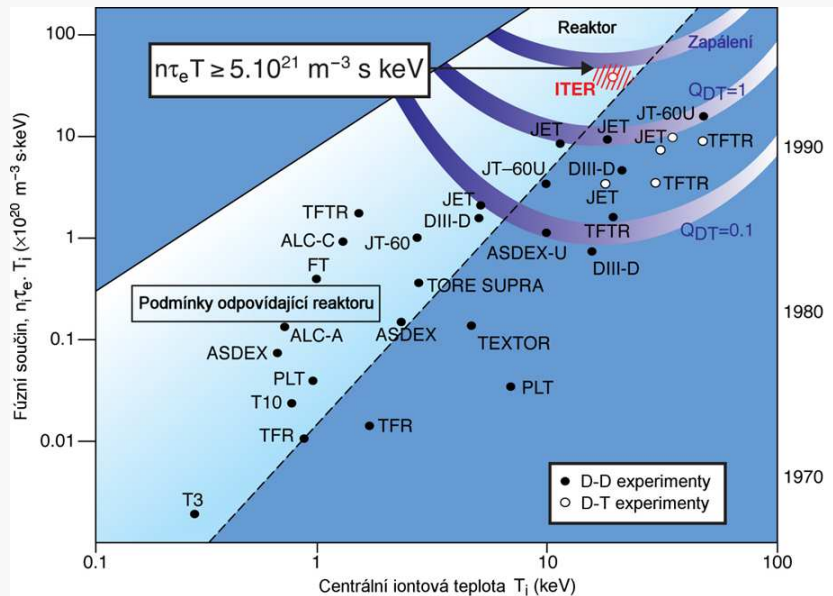
- palivo není radioaktivní, ale He3 je pouze na Měsíci

Deuterium-Deuterium

- vyžaduje vysoké teploty 1 – 10 miliard stupňů!!

Proton-Proton

- probíhá na Slunci



Jaderná fúze

Základní předpoklad pro slučování jader deuteria a tritia

Rychlost jader musí být větší než 20 tisíc km/s!

Za normální (pokojevé) teploty se jádra (atomy) pohybují pouze rychlostí 1 km/s

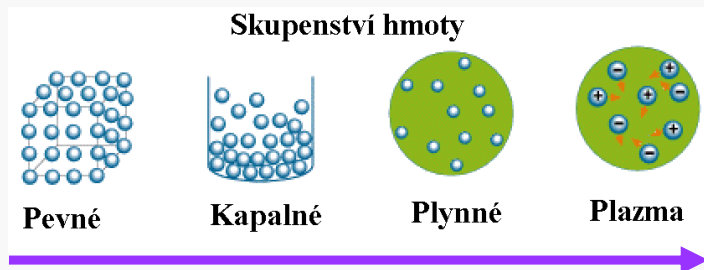
➡ abychom jádra paliva urychlili na požadovanou rychlost, je třeba ohřát směs deuteria a tritia na teplotu 200 milionů stupňů !

Při tak vysokých teplotách je palivo ve stavu, který se nazývá **plazma**

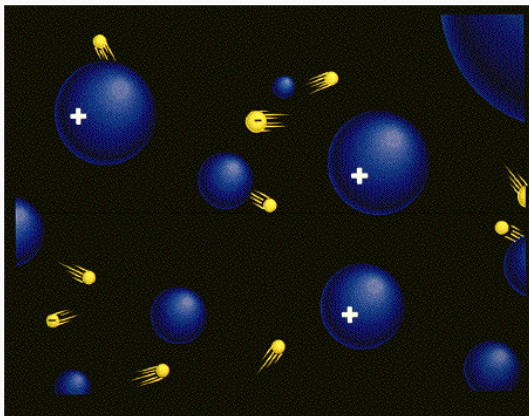
Jaderná fúze

Co je to PLAZMA

OHŘEV
OBJEMU
ČÁSTIC
↓
PLAZMA



Teplota (střední energie)

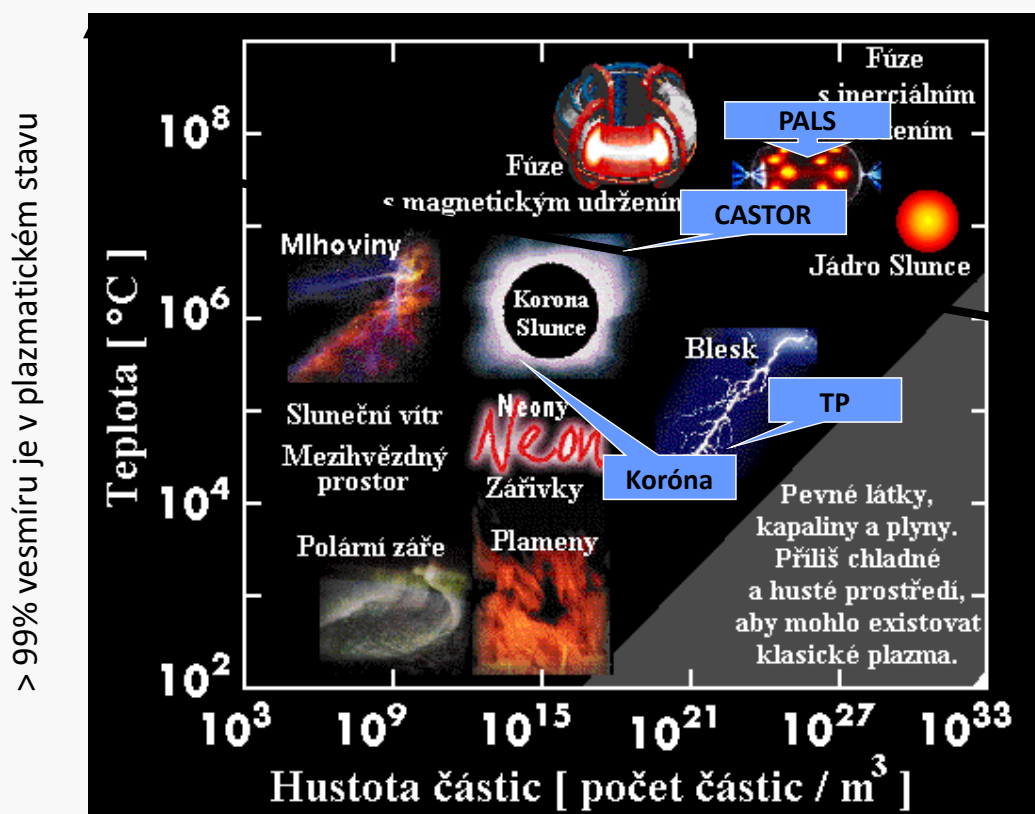


Počet elektronů = Počet iontů

Dominují elektrické síly

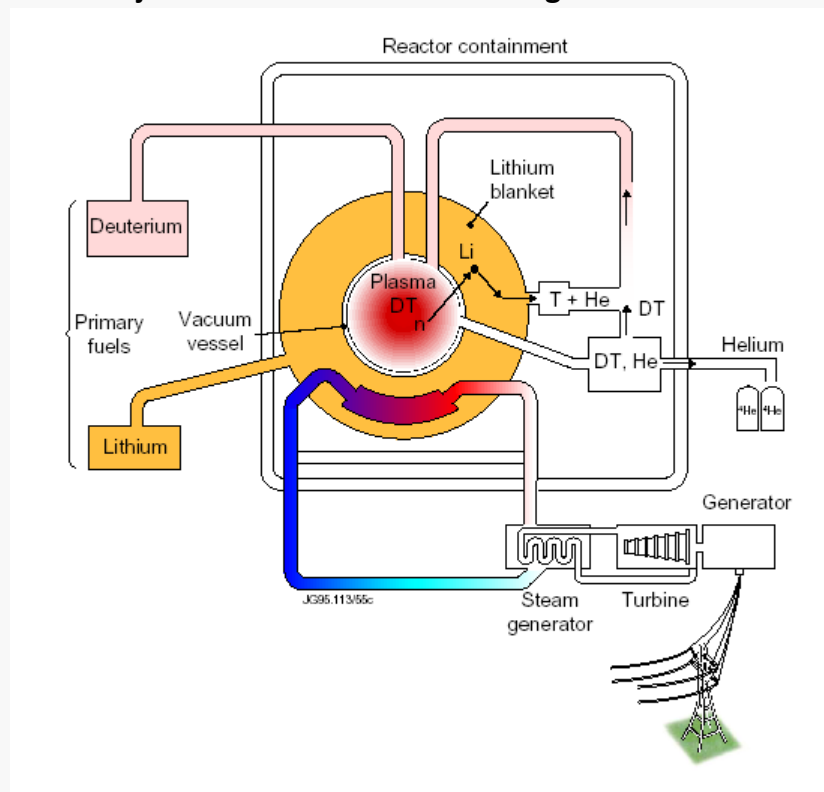
Kolektivní chování částic

PLAZMA ve Vesmíru a na Zemi



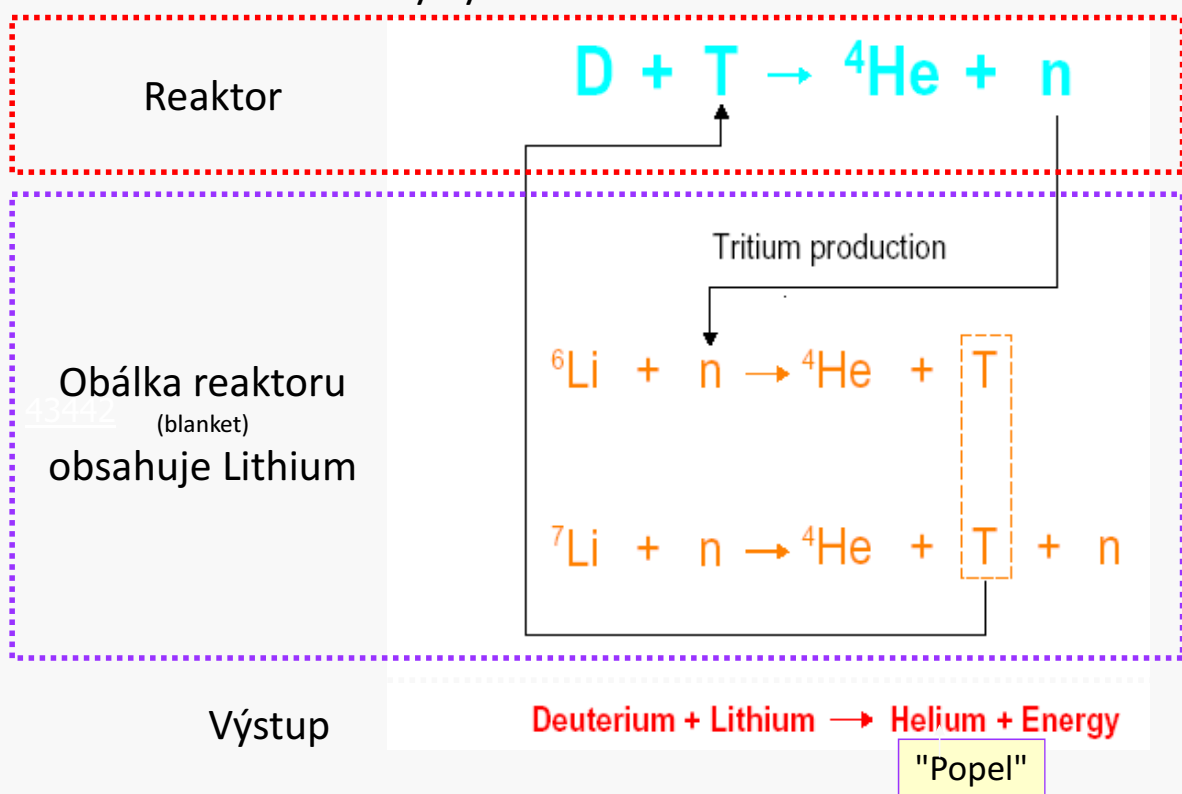
Jaderná fúze

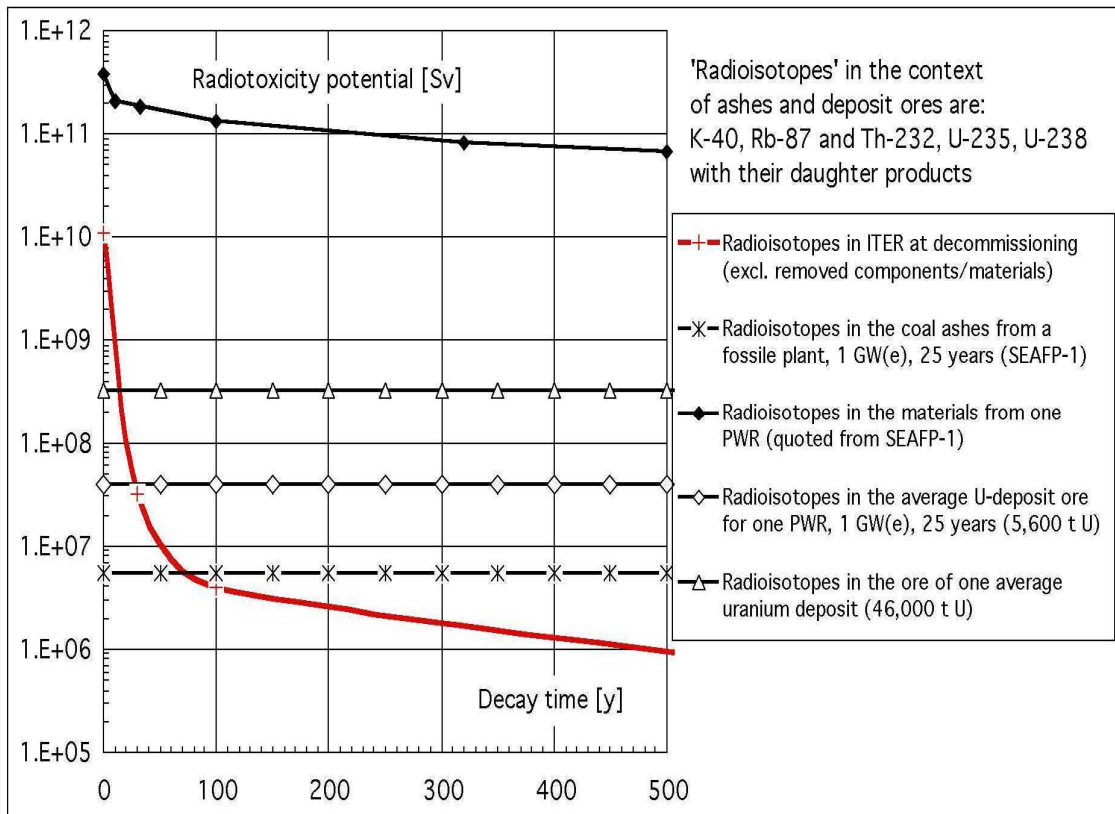
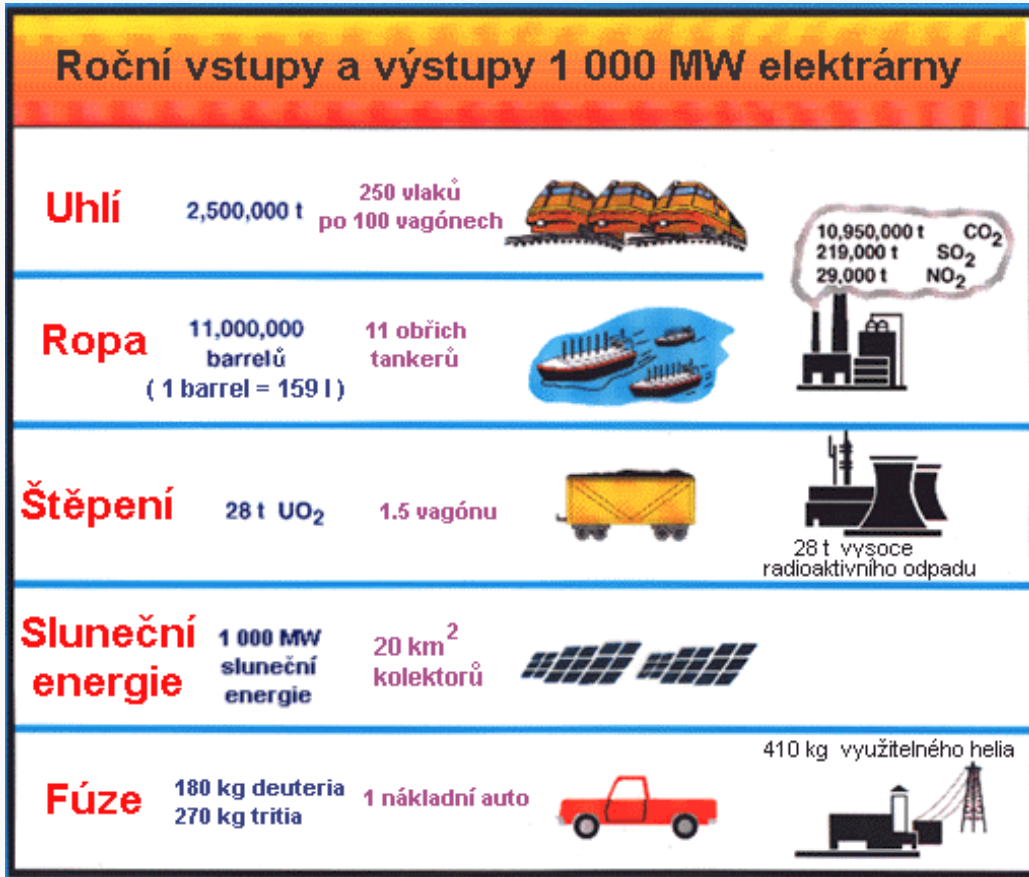
Termojaderná elektrárna na bázi magnetického udržení

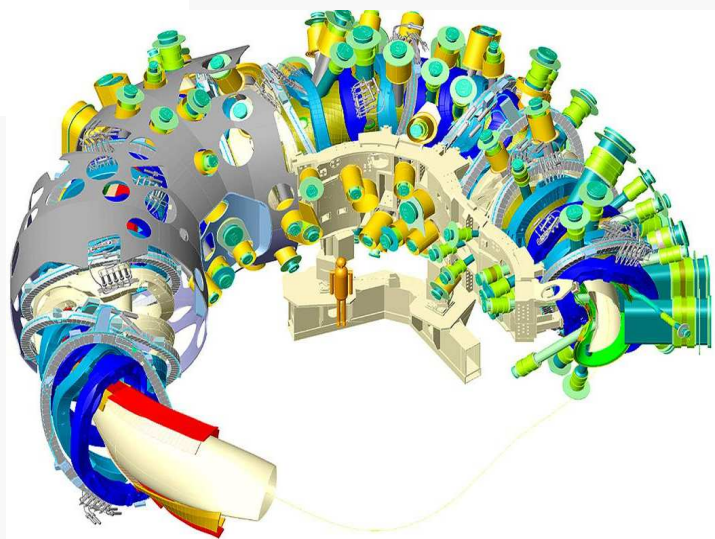
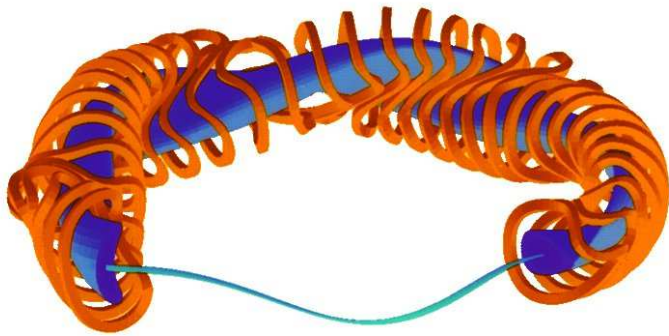
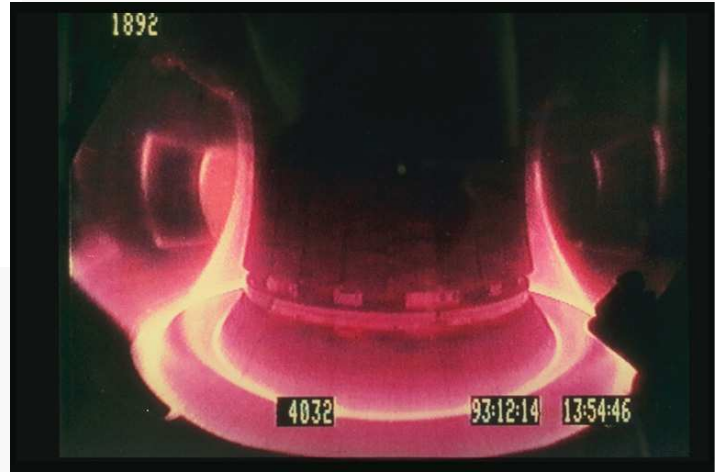
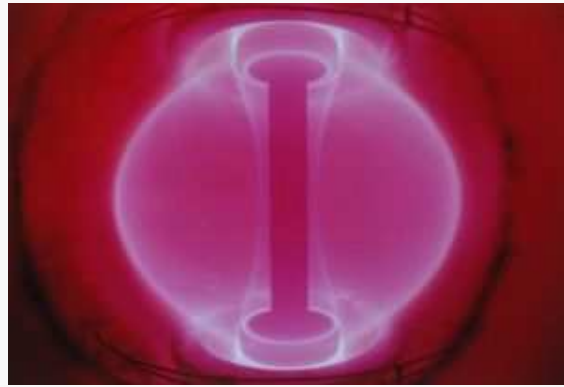
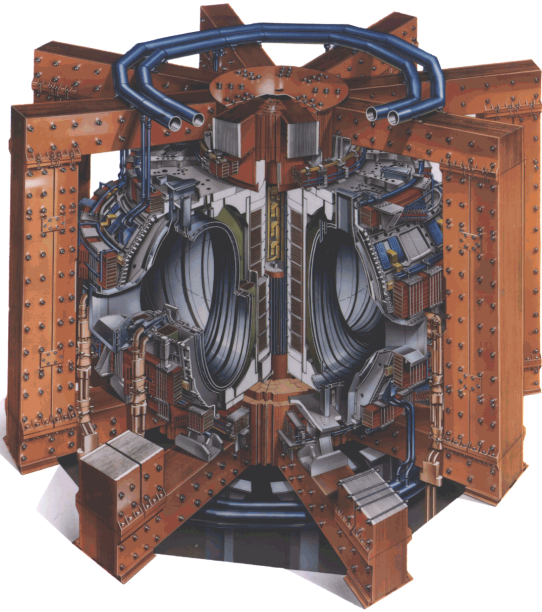


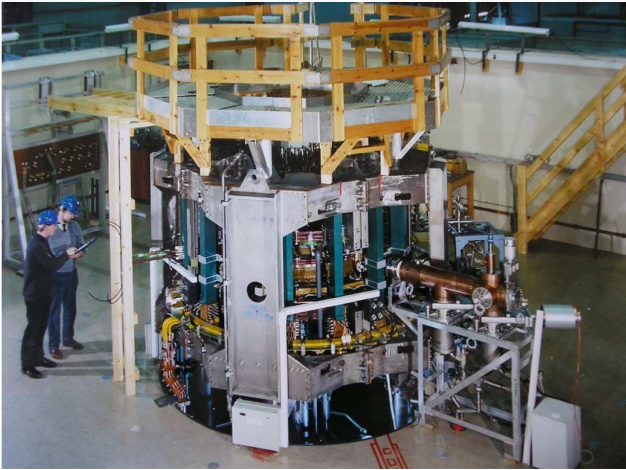
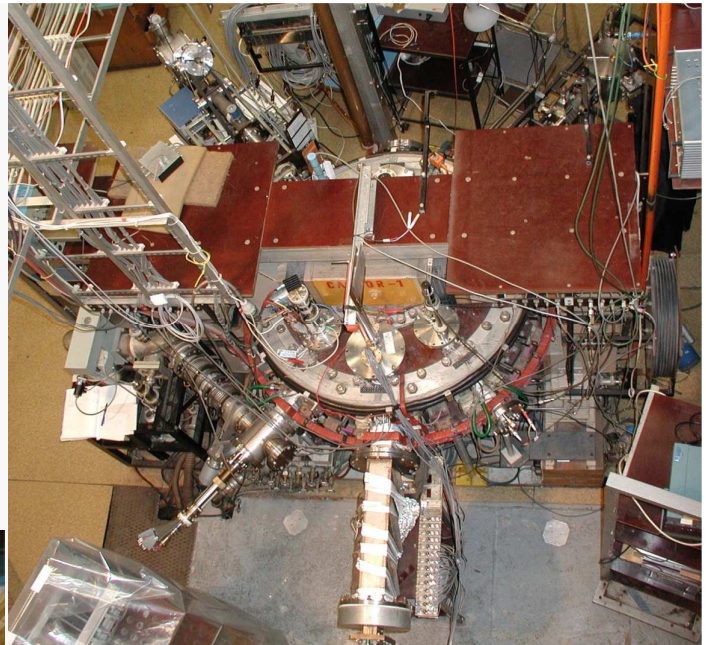
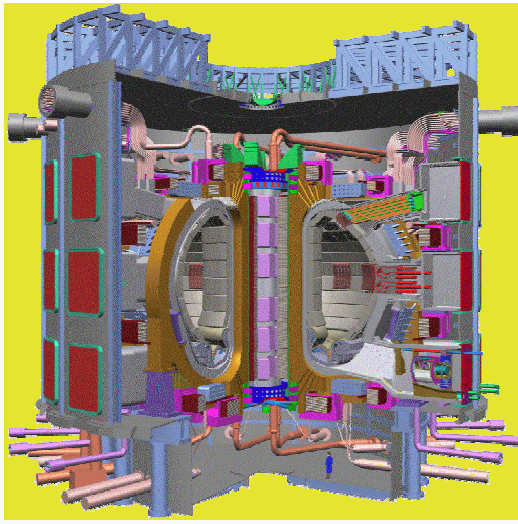
Jaderná fúze

Palivový cyklus fúzního reaktoru









Netradiční jaderné aplikace a budoucnost výstupy z kapitoly

Systemy GIV

- v čem se nejvíce reaktory 4. generace liší od reaktorů současných

Transmutory

- v čem je jejich přínos

Jaderná fúze

- princip termojaderné fúze, příklad reakce
- palivový cyklus fúzního reaktoru