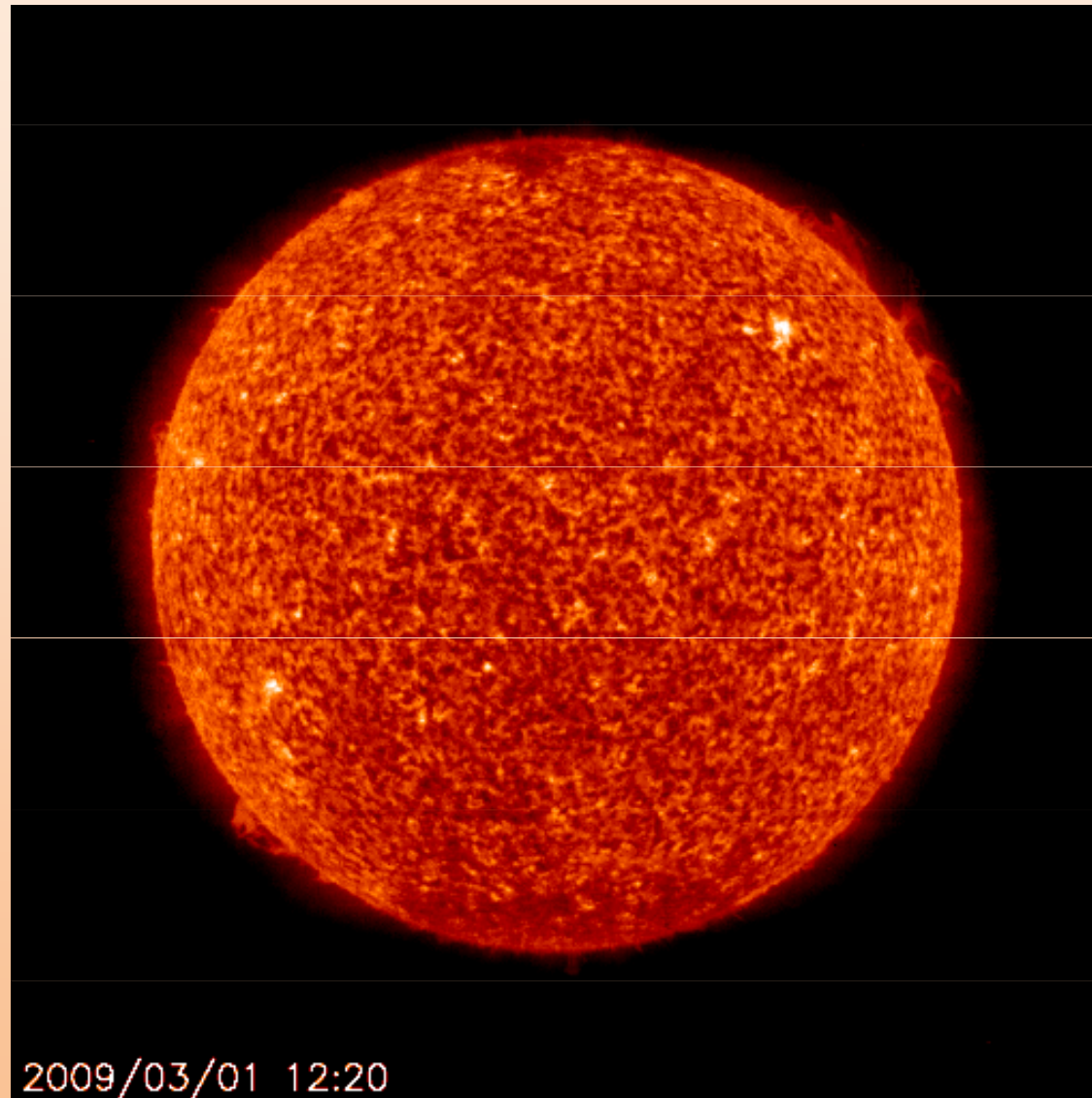
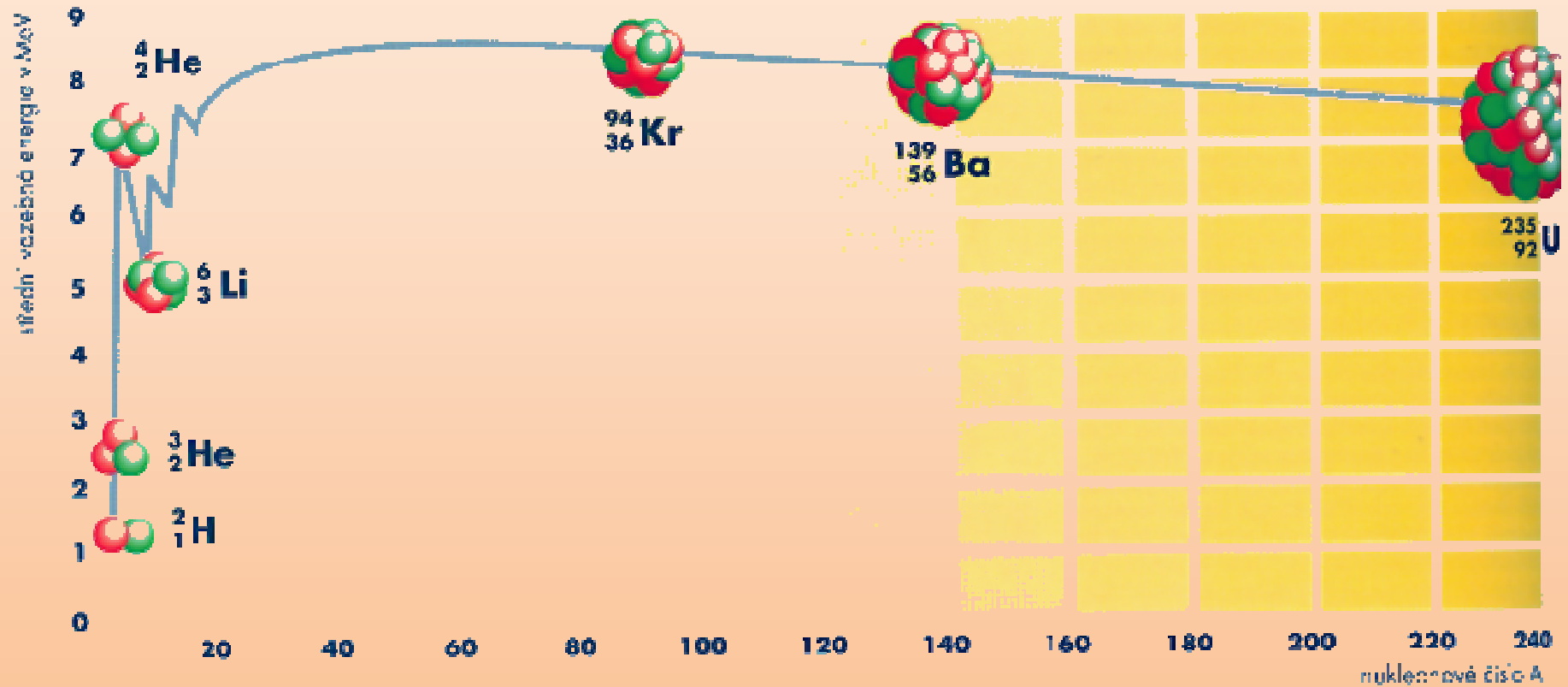


# Energetická krize a tokamak ITER



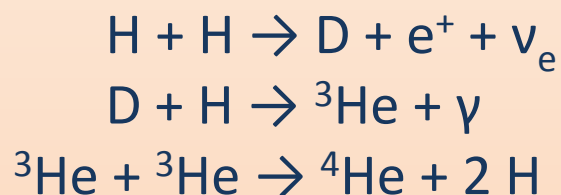
Mgr. Jiří Křivohlávek

# Slučování X štěpení

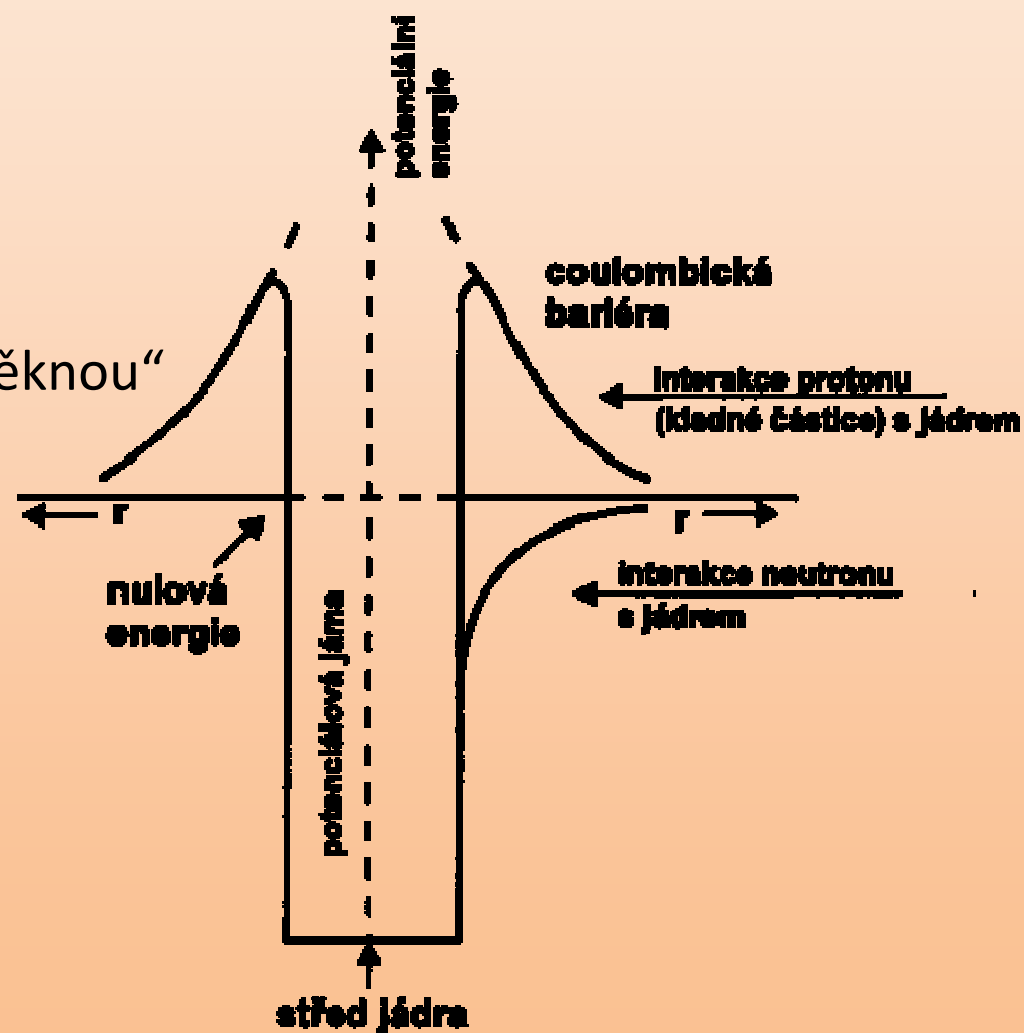


Gráf závislosti střední vazebné energie na nukleonovém čísle A

# Nejlepší termonukleární reaktor: SLUNCE

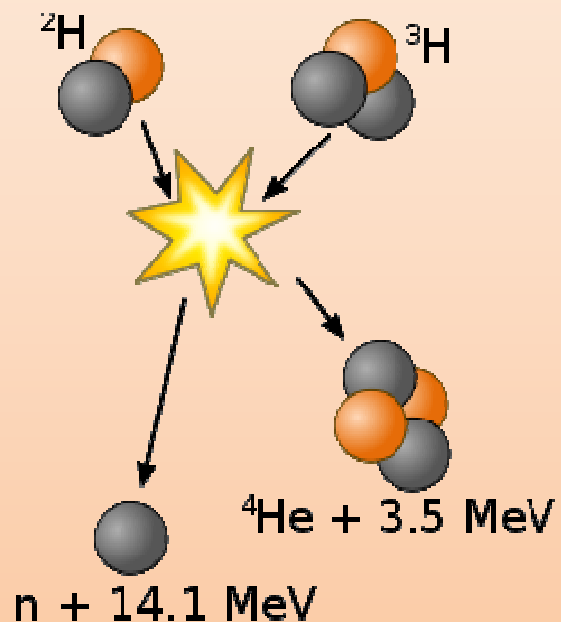


- pozitrony anihilují
- vysoce energetické fotony „měknou“
- foton letí ven 1 Myr
- teplota v jádru cca 15 MK
- v našem těle,  $7 \cdot 10^{14}$  n/s
- za život 2 – 3 v těle zaniknou
- odnáší 4 % energie



# Na Zemi: TOKAMAK

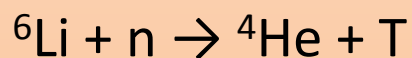
тороидальная камера с магнитными катушками



Navrhl Andrei Sacharov a Igor Tamm  
v ústavu I.V. Kurčatova v Moskvě v r. 1950

- nutná teplota až 150 MK
- zásoby D „nevyčerpatelné“
- 1 D na 6500 H

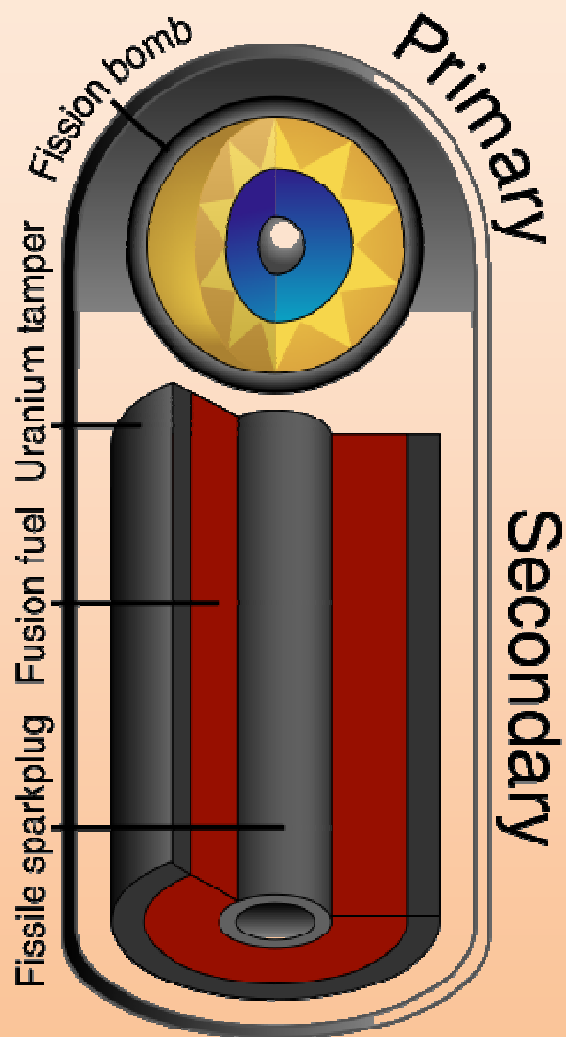
## Produkce T:



„Lithium z jedné baterie pro laptop a voda  
v jedné vaně vody stačí zásobit  
průměrného Evropana po dobu 30ti let!“

- $\alpha$  ohřívá palivo
- $\gamma$  a n výroba elektřiny

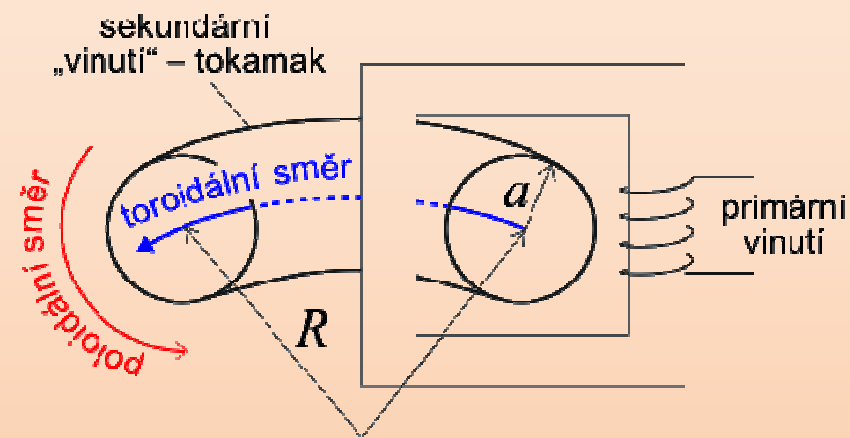
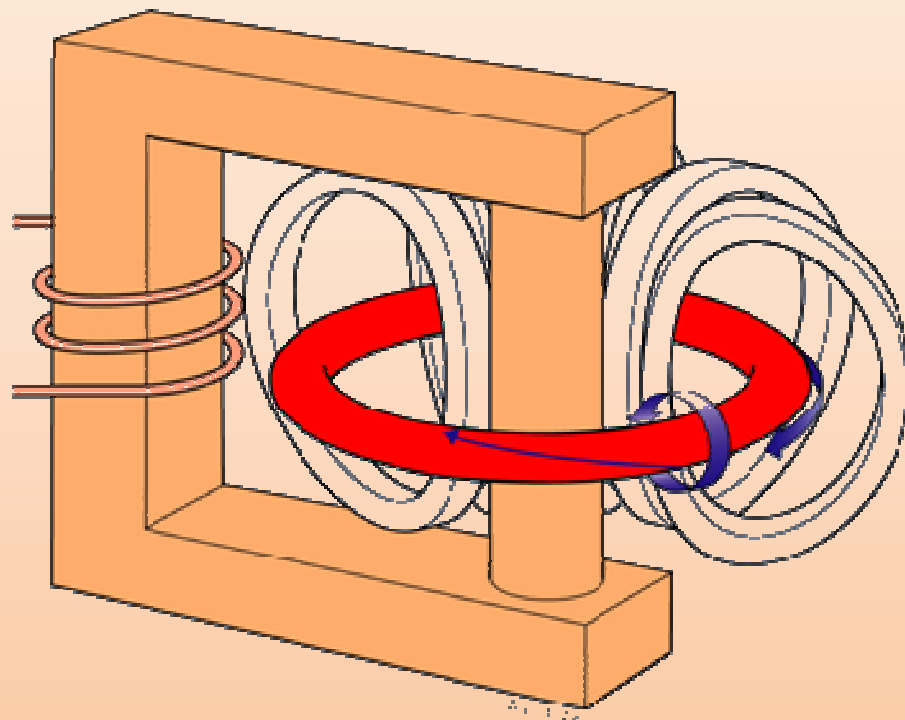
## ... nebo vodíkové bomby



*Царь, 57 Mt, 30. 10. 1961, Новая Земля*

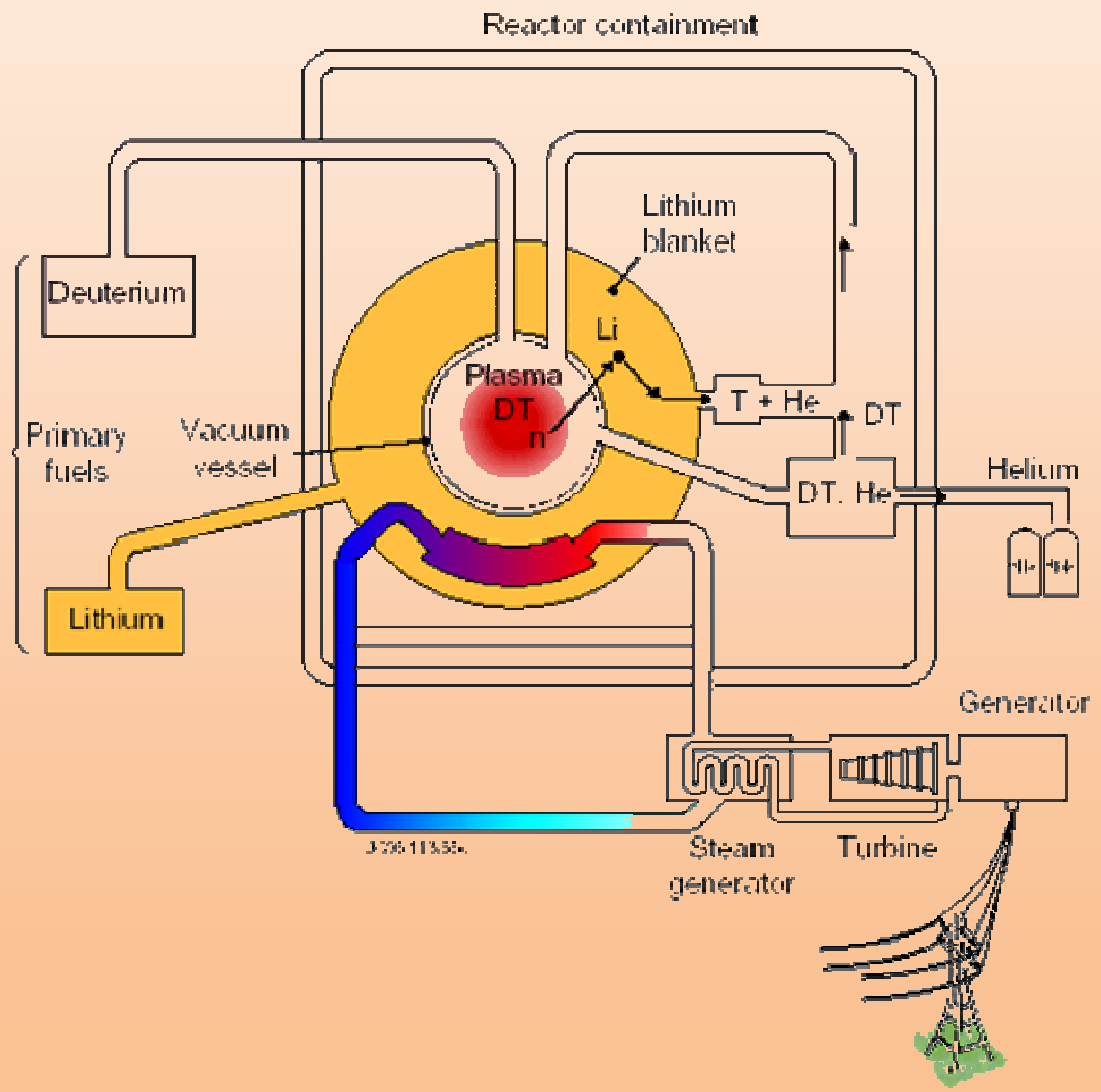
**Iniciace:** konvenční U či Pu bomba, **palivo:** LiD

# Princip TOKAMAKU



- plazma je udržováno uprostřed toroidu magnetickým polem
- plazma tvoří sekundární vinutí transformátoru
- plazma je ohříváno indukčním proudem  $P_{oh} = R \cdot I^2$

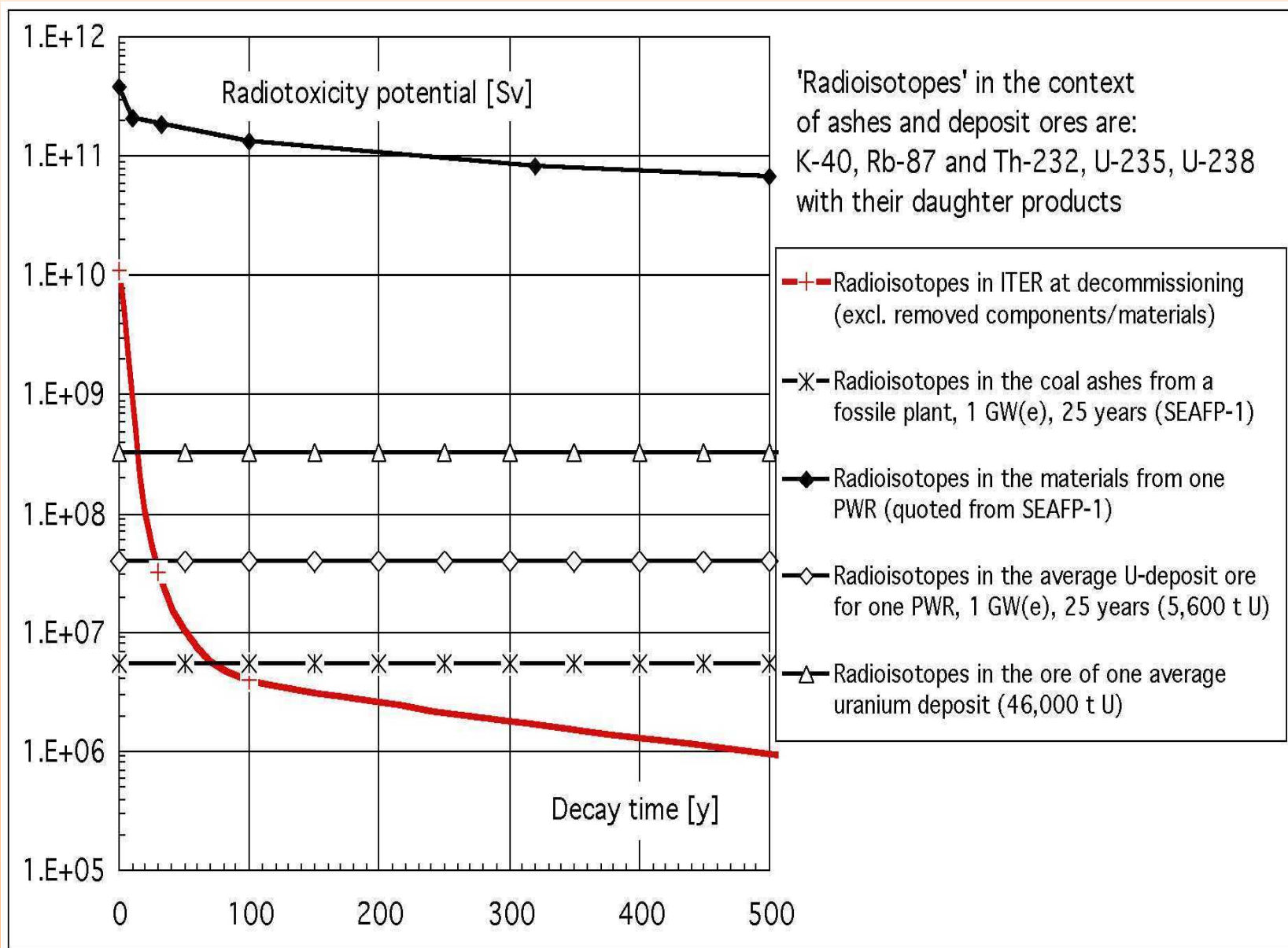
# Schéma TN elektrárny



# Výhody jaderné fúze

- reaktor je vnitřně **bezpečný**
- minimální množství radioaktivních materiálů (několik kilogramů tritia)
- zásoby paliva (deuterium + lithium) vystačí na **tisíce** let
- palivo je **rovnoměrně rozděleno** po celé zeměkouli
- náklady na dopravu paliva jsou minimální
- deuterium se snadno připraví opakovanou elektrolýzou vody
- produkt fúzní reakce - zcela přátelský k životnímu prostředí
- fúzní elektrárna **neprodukuje** skleníkové plyny
- zbytková radioaktivita – **relativně rychle zmizí**



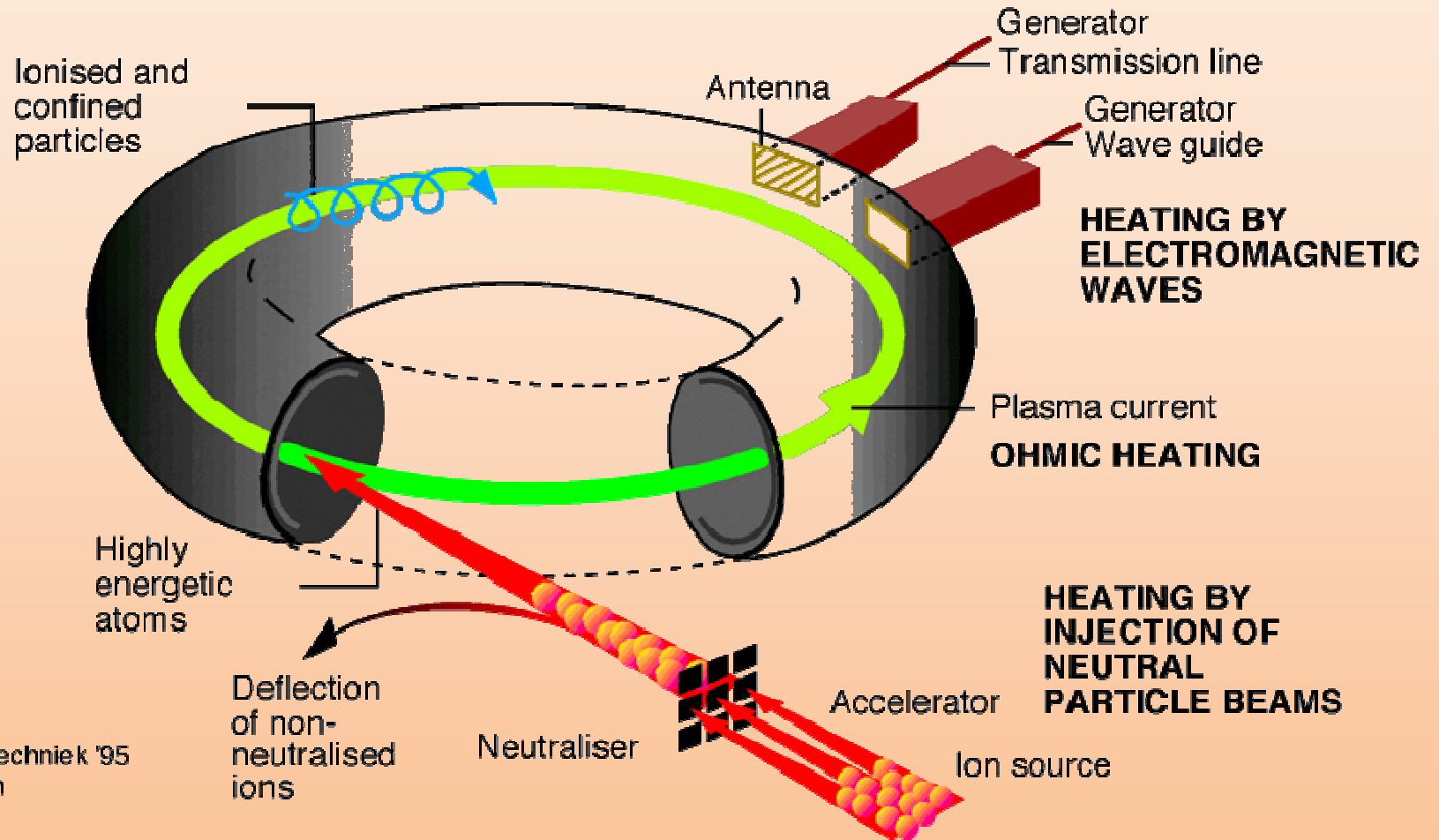


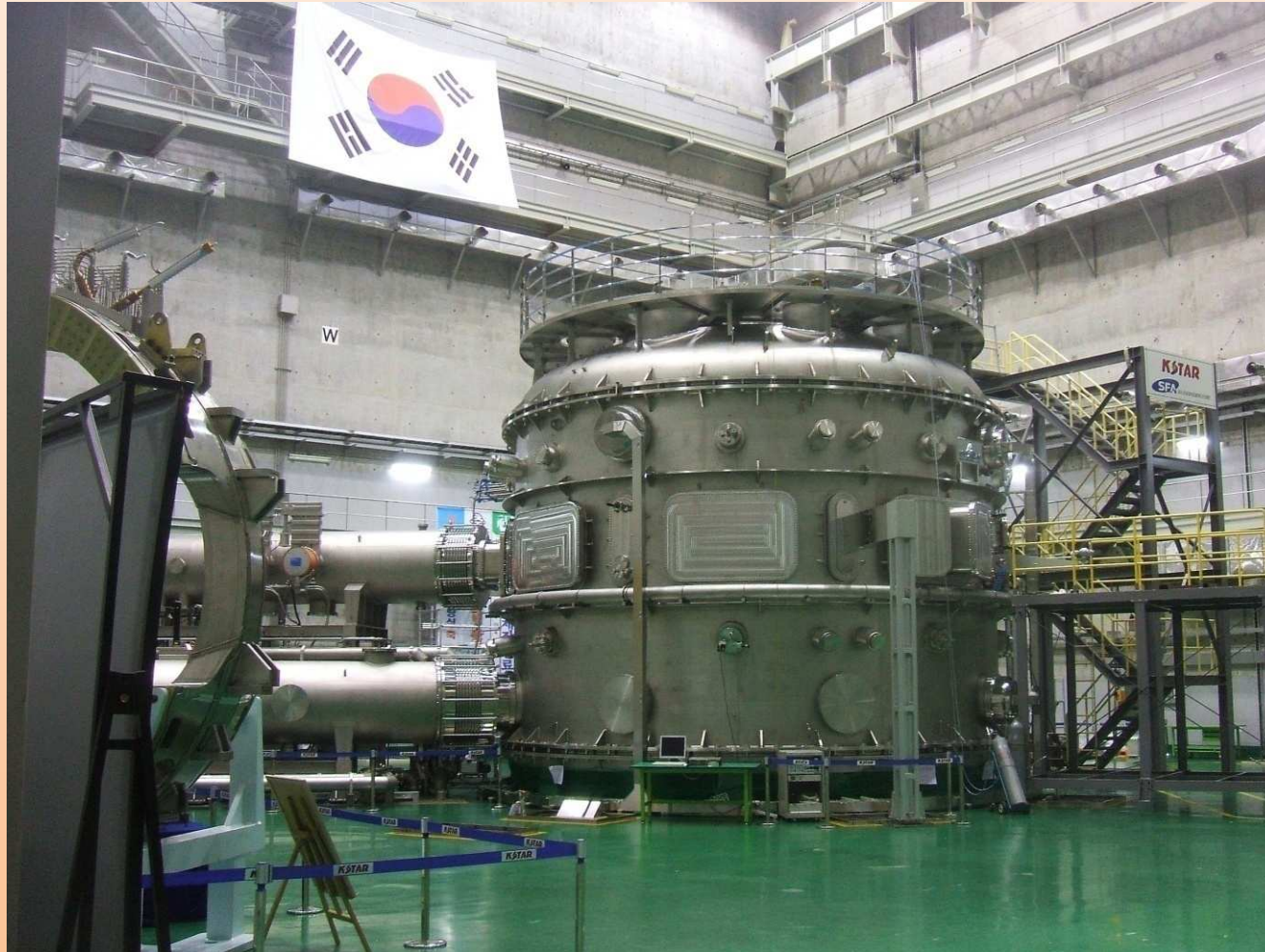
# Fyzikální a technologické problémy

- udržení a ohřev plazmatu
- obrovský teplotní gradient  $200\ 000\ 000\ ^\circ\text{C}/\text{m}$
- obrovská tepelná a neutronová zátěž vnitřní stěny reaktoru

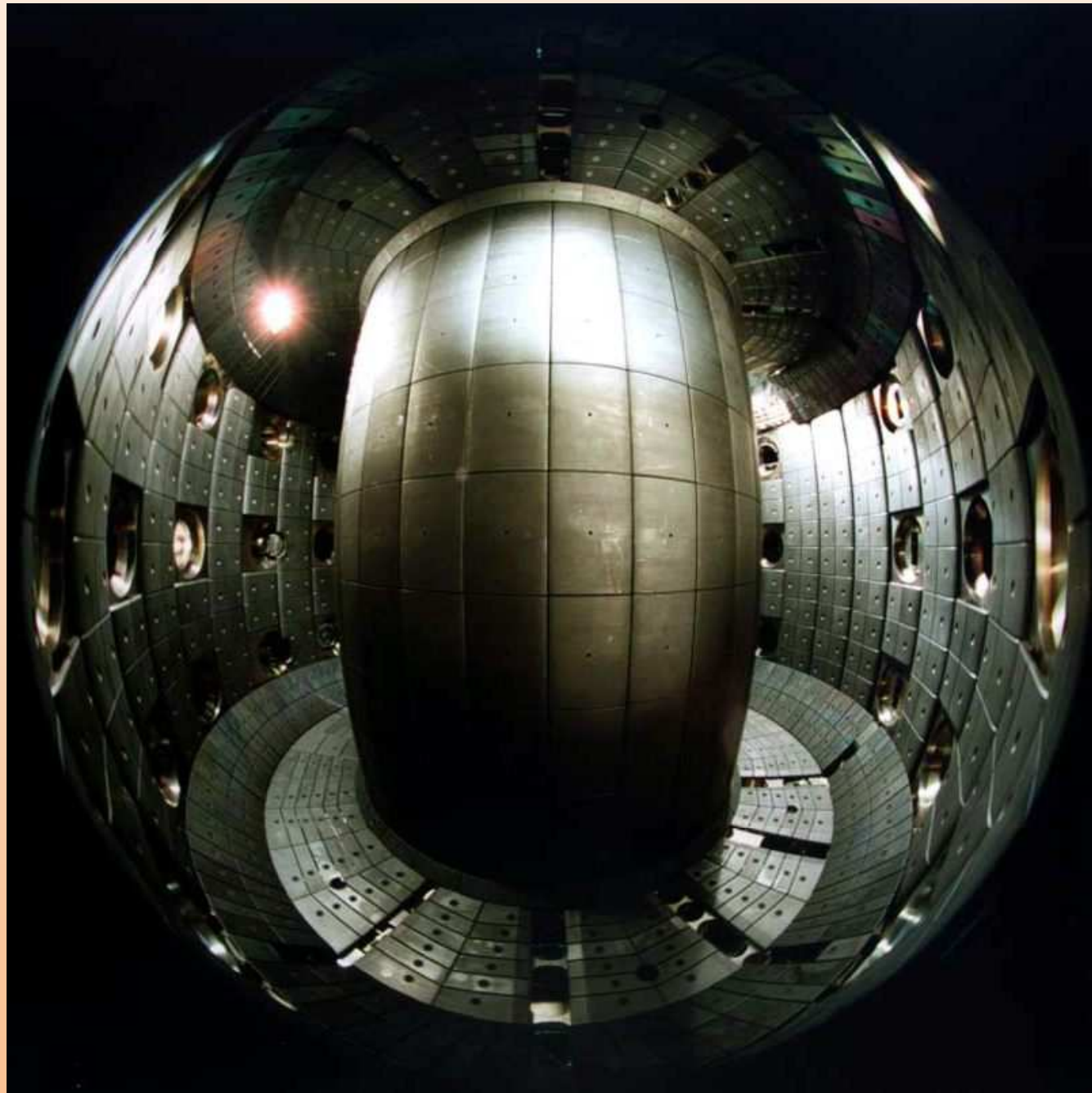
**S rostoucí teplotou klesá ohmický odpor a tedy i ohmický příkon!**

# Dodávání energie plazmě





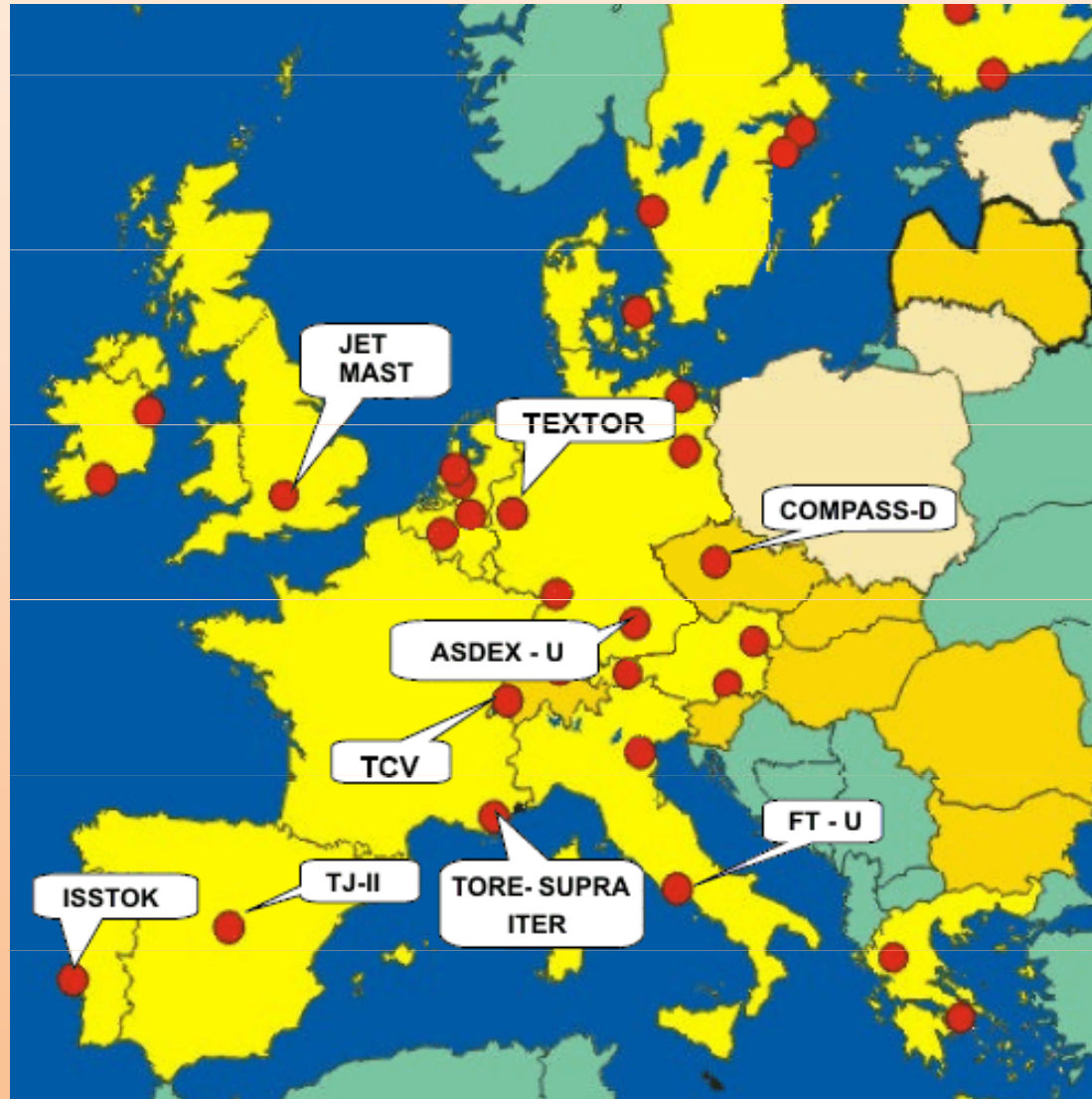
*Projet KSTAR (Daejeon, Jižní Korea).*



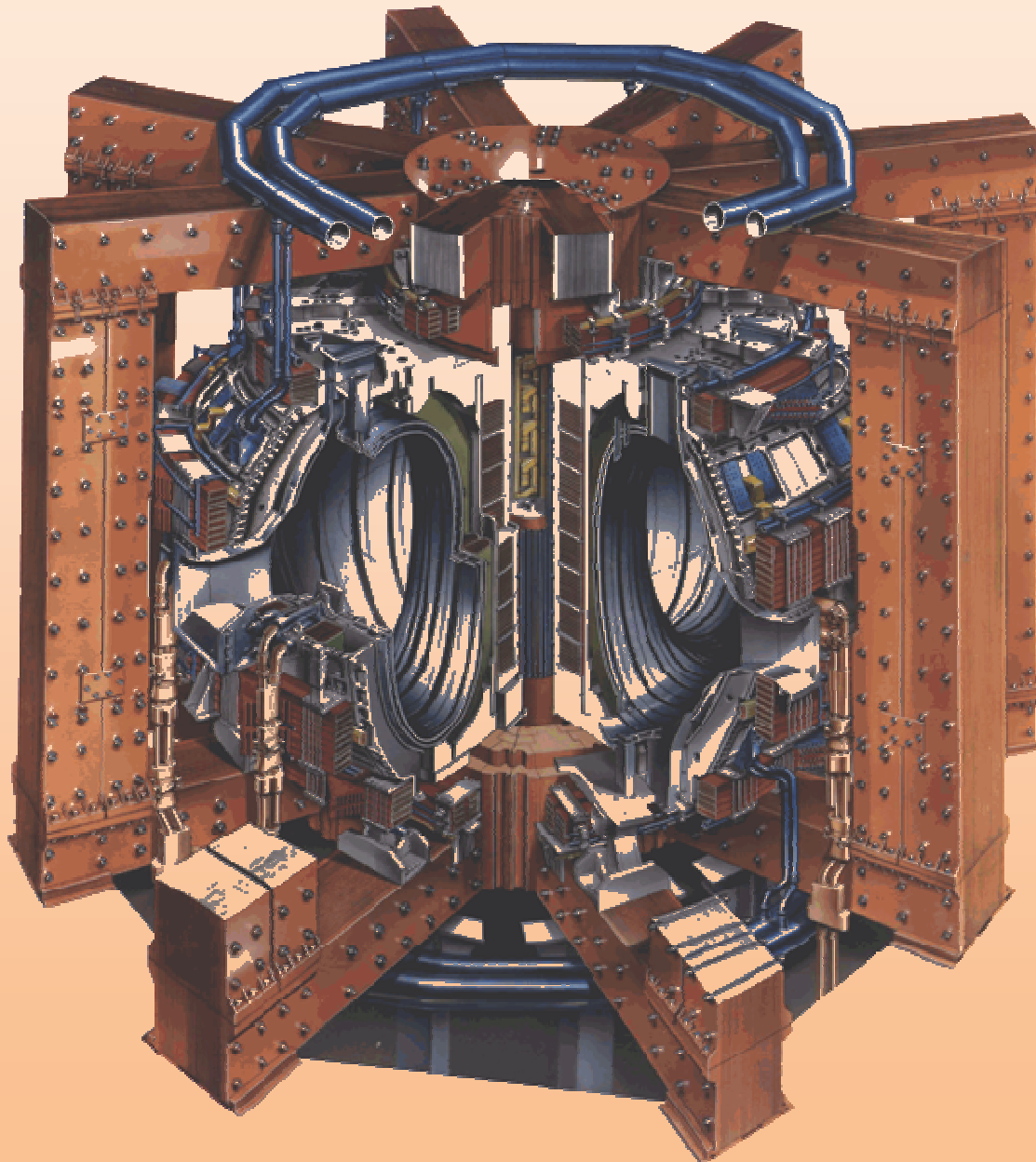
*Tokamak à Configuration Variable (TCV): inner view, with the graphite-clad torus.  
Courtesy of CRPP-EPFL, Association Suisse-Euratom*



# TOKAMAKy v Evropě



# JET (Joint European Torus)



**Stavba 1975 - 1983**

**Provoz do 2014**

# TOKAMAKy v Česku

## **CASTOR (Czech Academy of Sciences TORus)**

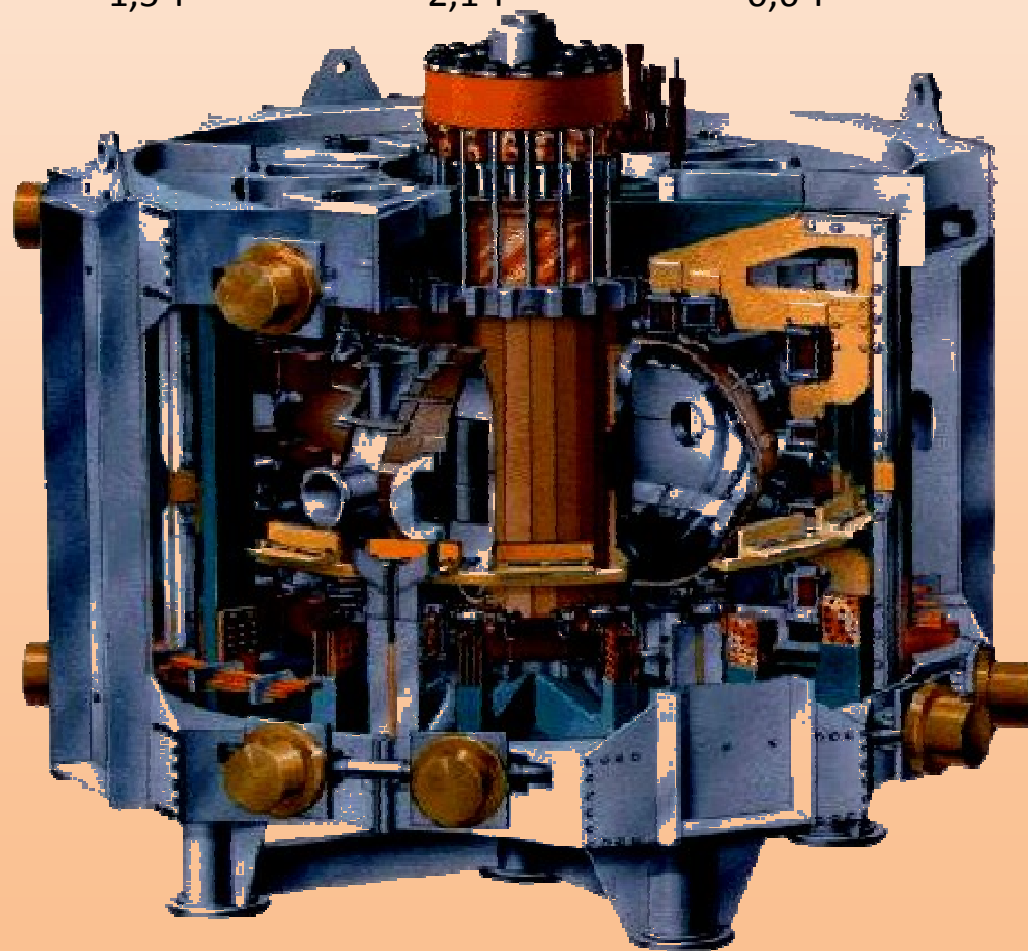
Objem 80 litrů, do konce roku 2006 byl v provozu v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky, postavený koncem 50. let 20. století v Kurčatovově ústavu v Moskvě a převezený do Československa v roce 1977.

## **COMPASS (COMPact ASSEMBly)**

V roce 2004 byl zdarma nabídnut anglickou agenturou pro atomovou energii UKAEA. V ČR od roku 2008.



Parametr	CASTOR	COMPASS-D	MAST	JET	ITER
Hlavní poloměr $R$	0,4 m	0,56 m	0,85 m	2,96 m	6,2 m
Vedlejší poloměr $a$	0,085 m	0,23 až 0,38 m	0,65 m	1,25 m	2 m
Objem plazmatu	0,08 m <sup>3</sup>	0,5 m <sup>3</sup>	7 m <sup>3</sup>	50 m <sup>3</sup>	873 m <sup>3</sup>
Proud	25 kA	400 kA	2 MA	5 MA	15 MA
Doba udržení	50 ms	2 s	5 s	20 s	400 s
Magnetické pole	1,5 T	2,1 T	0,6 T	3,5 T	5,3 T



# TOKAMAK ITER

**ITER** - International Thermonuclear Experimental Reactor, též latinsky **cesta**.

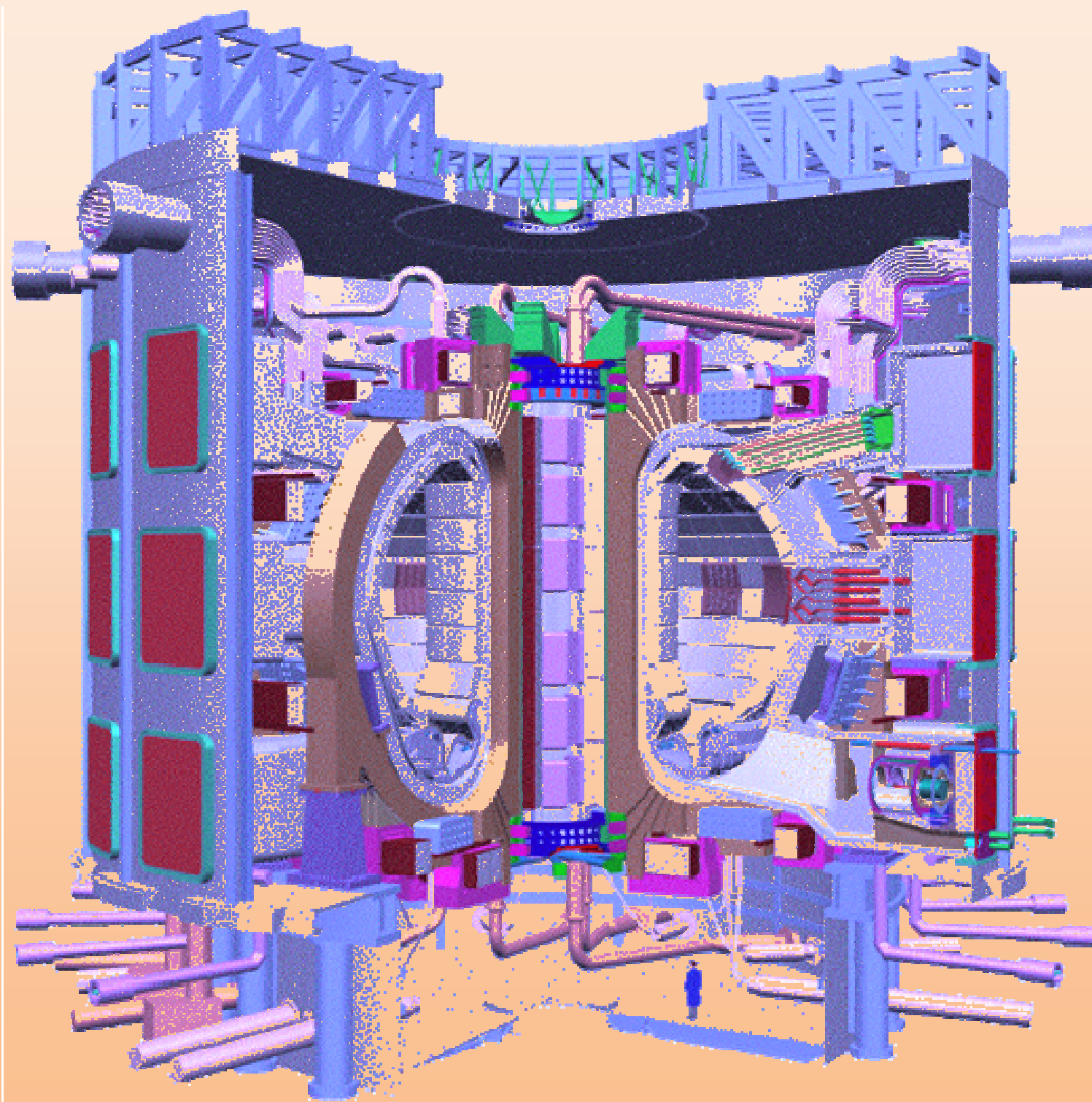
- 2. nejdražší projekt v historii lidstva
- celkový rozpočet projektu je 10 mld. € (polovinu uhradí EU)
- zbytek ostatní účastnické státy: USA, Rusko, Čína, Japonsko, Jižní Korea, Indie
- výkon cca 500 MW

## Programový cíl

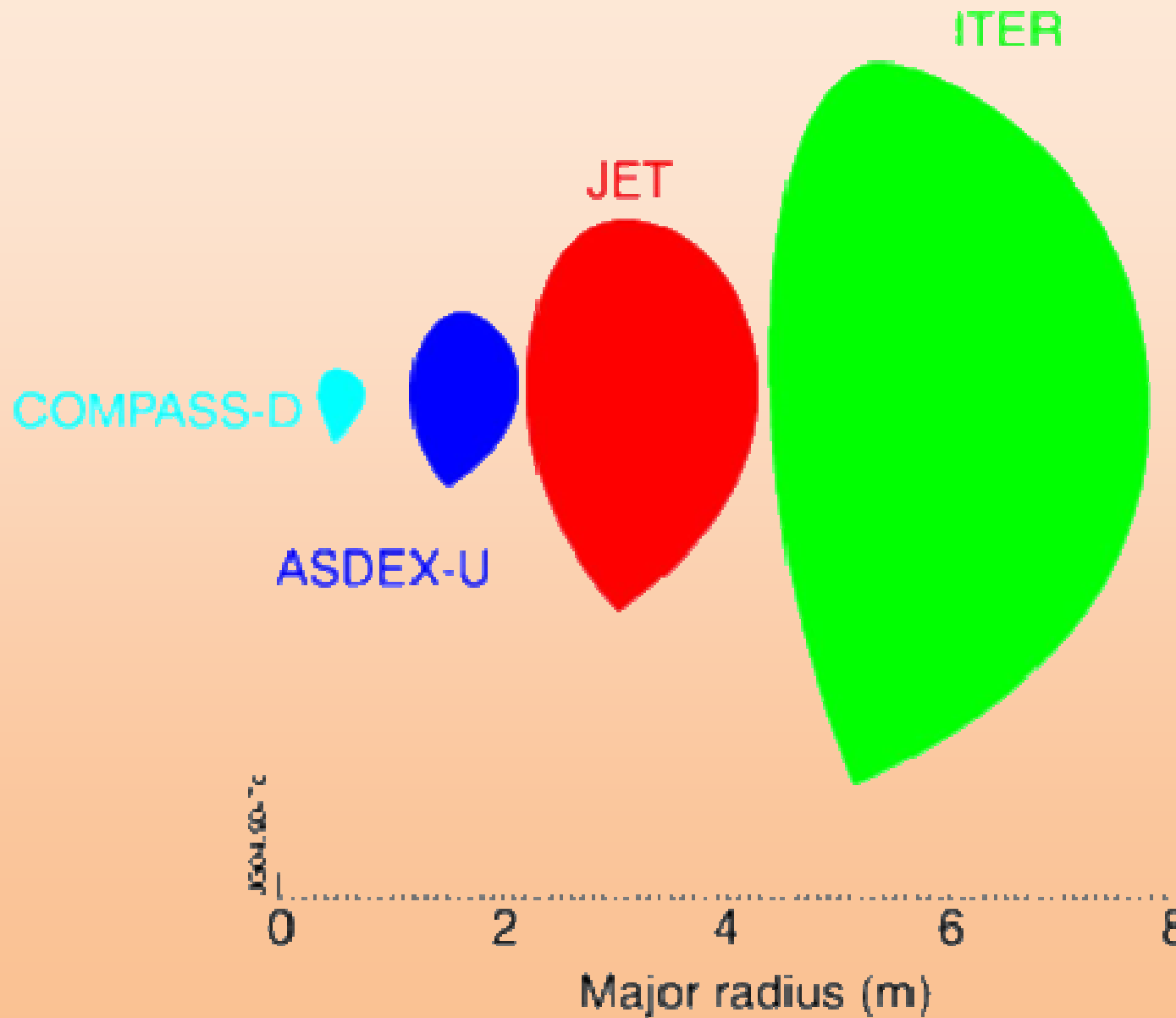
- prokázat vědecké a technologické využití fúzní energie pro mírové účely, tak aby bylo možno zkonstruovat elektrárnu v letech 2030-2050.

## Technické cíle

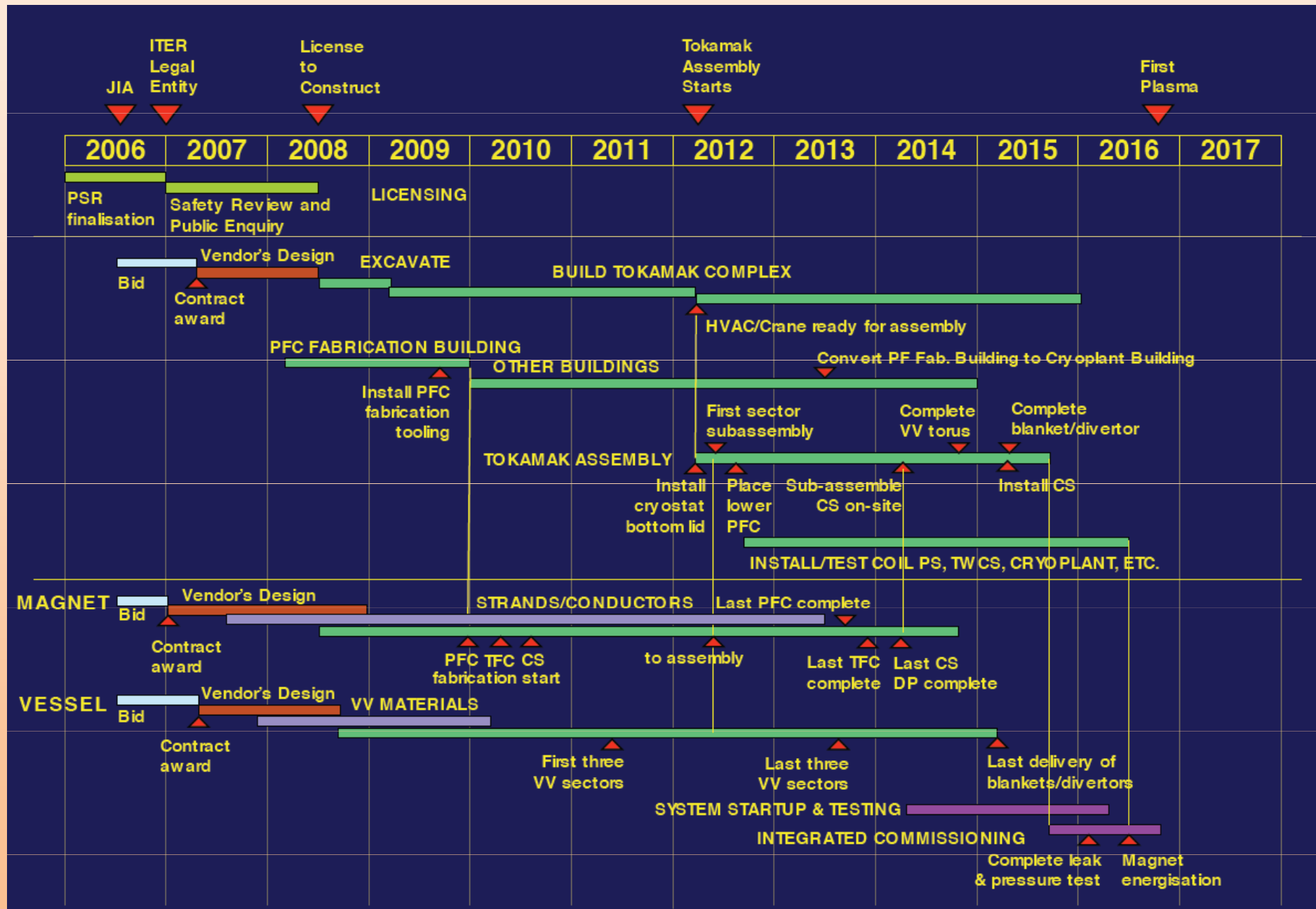
- prokázat vysoký energetický zisk ( $Q = 10$ ) po dobu 400 sek při použití palivové směsi DT
- prokázat energetický zisk ( $Q = 5$ ) v dlouhých pulsech delších než 1000 sek.
- testovat důležité technologie v reaktorových podmínkách
- testovat jednotlivé komponenty při vysokých neutronových tocích
- demonstrovat bezpečnost fúze a její kompatibilitu s životním prostředím



# Srovnání parametrů TOKAMAKŮ



# Časový plán projektu ITER



**Děkuji Vám za pozornost.**