

# Jaderný reaktor není jen v jaderné elektrárně

doc. Ing. Ľubomír Sklenka, PhD.

Katedra jaderných reaktorů

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

České vysoké učení technické v Praze

# Obsah

- Za všechno může Enrico Fermi
- Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny
- Jak může výzkumný reaktor vypadat
- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru
- Výzkumné reaktory v Československu a České republice
- Závěr

# Za všechno může Enrico Fermi

- V průběhu druhé světové války se Američané oprávněně obávali, že Němci vyvinou jadernou bombu
- V roce 1941 Arthur H. Compton, profesor fyziky na University of Chicago, se stal vedoucím týmu, který měl vyvinout technologii pro výrobu plutonia pro americkou protizbraň - jadernou bombu
- V Comptonově týmu byli mj. i Enrico Fermi, Leo Szilard, Eugene Wigner, Alvin Weinberg a další
- Enrico Fermi měl na starosti experimentálně ověřit udržitelnost štěpné řetězové reakce po dostatečně dlouhou dobu, tak aby jejím prostřednictvím bylo možné vyrobit plutonium

# Za všechno může Enrico Fermi

- Fermi postupně sestavil několik tzv. podkritických souborů složených z grafitu (moderátor) a uranu (palivo) – tzv. „pile“
- V zimě 1942 Fermi se svým týmem složil již 30. „pile“, který konečně byl schopen dosáhnou kritičnost, tj. udržet štěpnou řetězovou reakci
- Chicago pile-1 (CP-1) se stal prvním reaktorem na světě:
  - první kritičnost 2. 12. 1942 v 14:35, odstaven 15:53
  - v provozu cca 3 měsíce do 28. 2. 1943 na maximálním výkonu 200 W
  - cca 385,5 t grafitu a 46,5 t uranu (kovového a  $\text{UO}_2$ )
  - rozměry cca. 7,3 m (d) x 7,3 m (š) x 5,8 m (v)
  - kritičnost byla dosažena vytahování kadmiových pásků

# Za všechno může Enrico Fermi

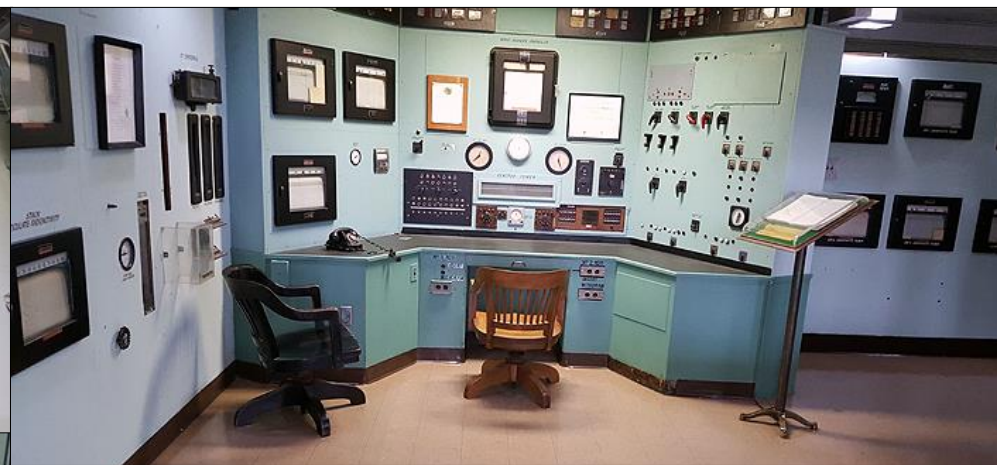
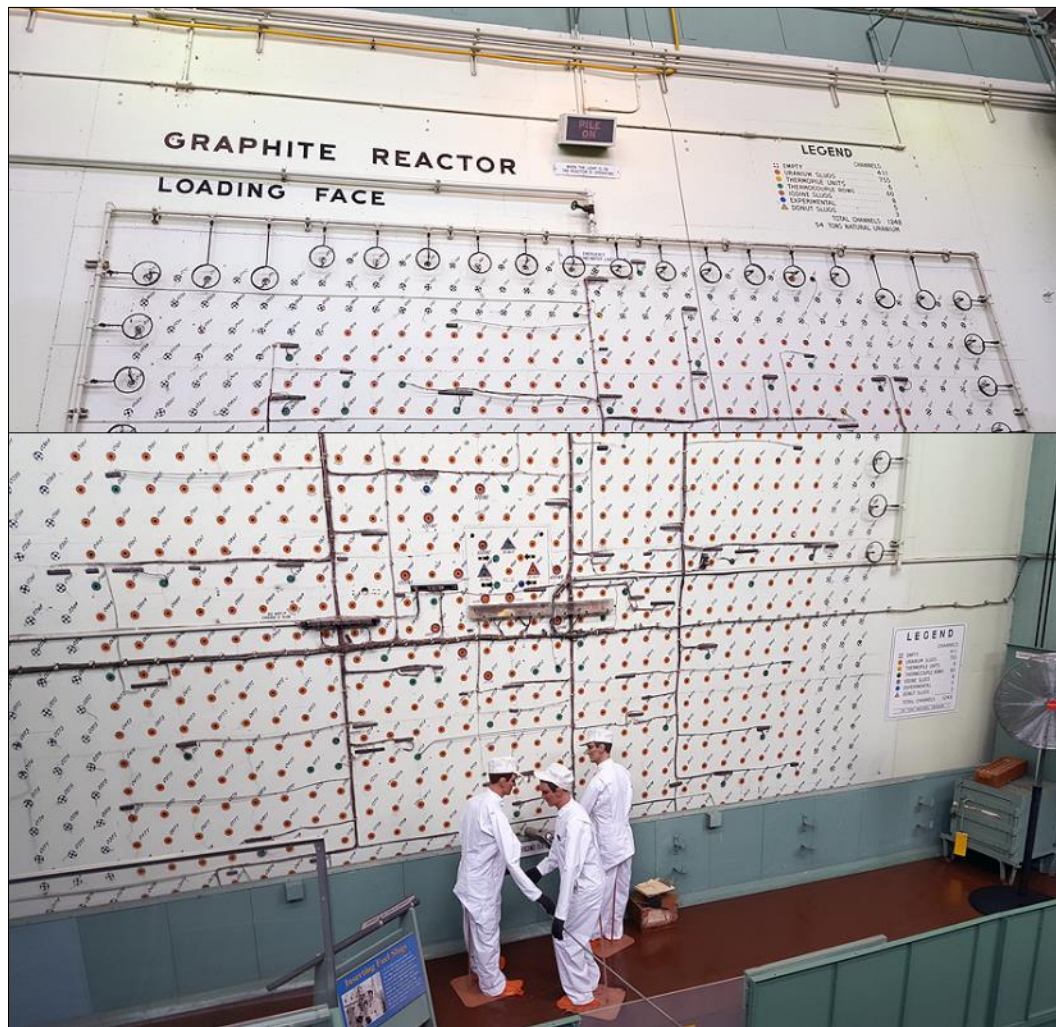


- Z experimentů se nedochovaly žádné fotografie, tyto obrázky namaloval Gary Sheahan v roce 1957 na základě rozhovorů s účastníky experimentů a dochovaných dobových písemných záznamů

# Za všechno může Enrico Fermi

- Druhý reaktor na světě byl vybudován a uveden do provozu v Oak Ridge v Tennessee – reaktor X-10 (také Graphite Reactor nebo Oak Ridge Pile):
  - byl vybudován s využitím zkušeností z Fermiho CP-1
  - hlavním účelem reaktoru bylo vyrobit plutonium pro první americké jaderné zbraně
  - byl postaven za 9 měsíců (únor - listopad 1943)
  - reaktor dosáhl první kritičnosti 4. listopadu 1943
  - výkon reaktoru byl 3,5 MW
  - první 2 g plutonia vyrobeny v prvních dvou měsících
  - po válce byl reaktor v provozu až do roku 1963 a využíván pro výzkum v oblasti mírového využívání jaderné energie a pro výrobu radioizotopů

# Za všechno může Enrico Fermi



Reaktor X-10 v současnosti proměněný na muzeum

# Za všechno může Enrico Fermi

Krajina	Označení	Název reaktoru	Typ	Výkon	První kritičnost
USA	CP-1	Chicago pile No. 1	grafitový	200 W	2. 12. 1942
Kanada	ZEEP	Zero Energy Experimental Pile	těžkovodní	1 W	5. 9. 1945
Sovětský svaz	F-1	F-1 Nuclear Reactor	grafitový	24 kW	25. 12. 1946
Velká Británie	GLEEP	Graphite Low Energy Experimental Pile	grafitový	42 kW	8. 8. 1947
Francie	ZOE	Zéro, oxyde d'uranium, eau lourde	těžkovodní	150 kW	15. 12. 1948
Norsko	JEEP-I	Joint Establishment Experimental Pile	těžkovodní	450 W	1. 6. 1951
Švédsko	R-1	Reactor No. 1	těžkovodní	600 kW	13. 7. 1954
Indie	Apsara	Apsara	lehkovodní	1 MW	4. 8. 1956
Japonsko	JRR-1	Japan Research Reactor No. 1	lehkovodní	60 kW	27. 8. 1957
Československo	VVR-S	Vodo-Vodyaniy Reactor	lehkovodní	2 MW	24. 9. 1957
Argentina	RA-1	Reactor Argentina No. 1	lehkovodní	40 kW	20. 1. 1958
Čína	HWRR	Heavy Water Research Reactor	těžkovodní	10 MW	červen?/září? 1958
Jižní Korea	KRR-1	Korean Research Reactor No. 1	lehkovodní	250 kW	19. 3. 1962

1957 – Německo, Švýcarsko a Rumunsko; 1958 – Polsko and Španělsko; 1959 – Maďarsko a Itálie; ...





# Za všechno může Enrico Fermi



Výzkumné reaktory za celou historii

846 v 71 zemích

Výzkumné reaktory za celou historii

Výzkumné reaktory v provozu v současnosti

237 v 54 zemích

Výzkumné reaktory ve výstavbě

11 v 8 zemích

Zdroj: IAEA RRDB (03/2021)

# Obsah

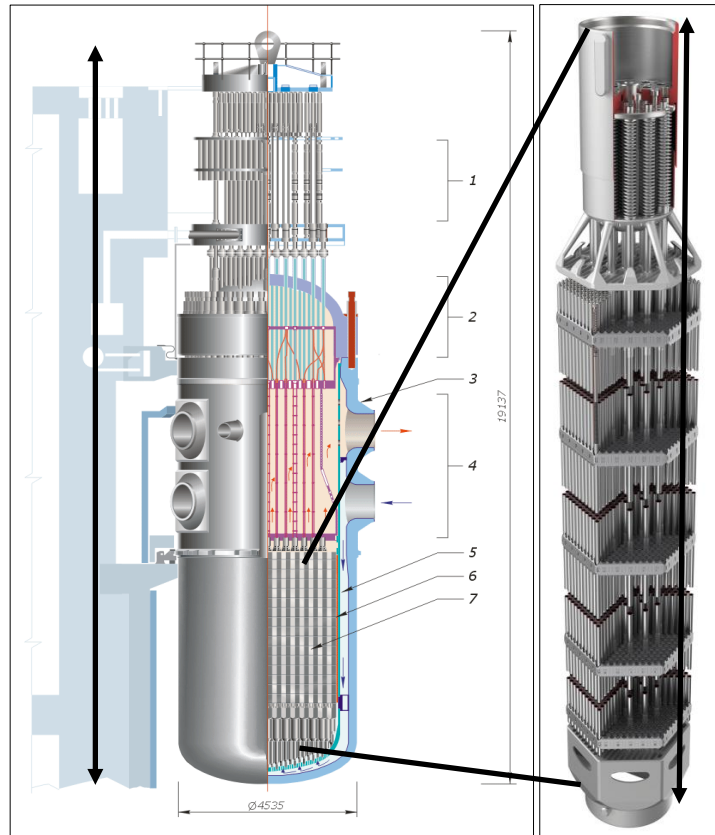
- Za všechno může Enrico Fermi
- **Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny**
- Jak může výzkumný reaktor vypadat
- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru
- Výzkumné reaktory v Československu a České republice
- Závěr

# Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny

- Jaderná elektrárna – energetické jaderné zařízení:
  - jaderné zařízení pro výrobu elektrické energie nebo tepla pro vytápění a průmysl
- Výzkumný reaktor – výzkumné jaderné zařízení:
  - jaderné zařízení, které není určeno pro výrobu elektrické energie, vytápění nebo produkci tepla pro průmyslové využití
- Výzkumný reaktor:
  - dělá se na něm věda, výzkum, vývoj (výzkumný reaktor)
  - nebo se na něm dělá výuka (výukový reaktor)
  - nebo se v něm něco vyrábí - produkuje (produkční reaktor)
  - nebo se na něm demonstruje nová technologie (demonstrační reaktor)
  - nebo kombinace výše popsaných možností

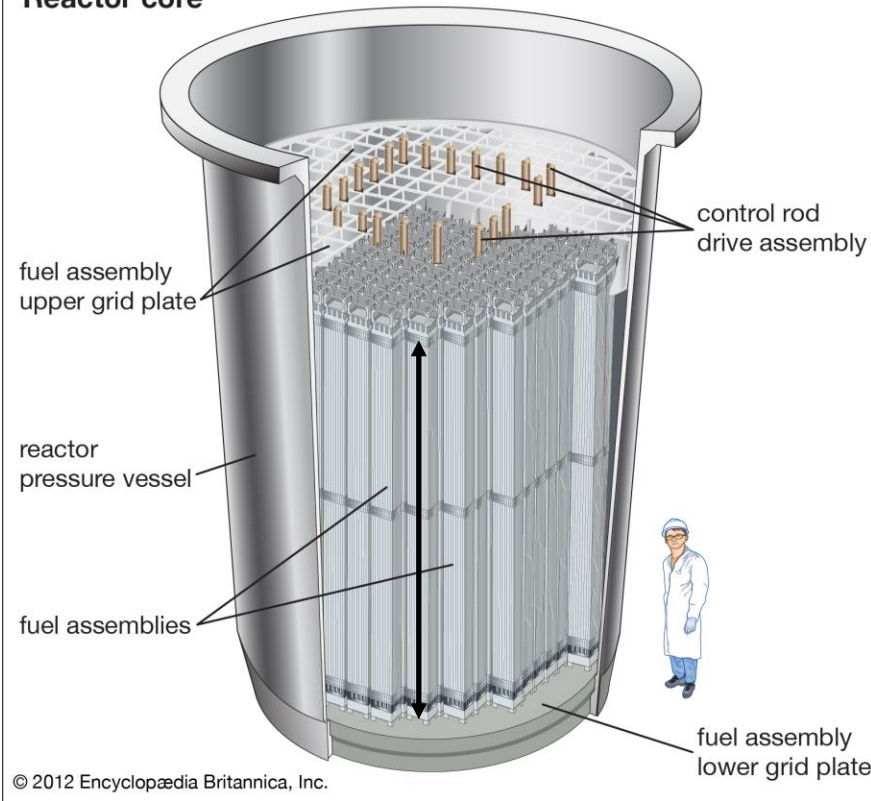
# Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny

## Jaderná elektrárna



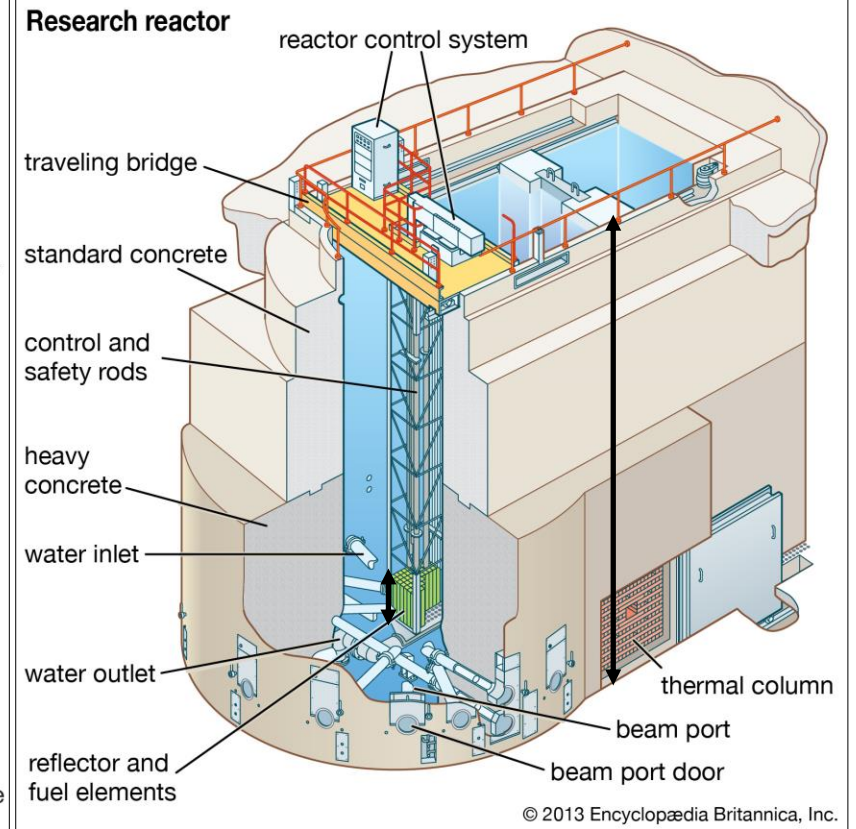
19 m  
3,5 m  
VVER-1000 – Elektrárna Temelín

### Reactor core



2,5-4 m

## Výzkumný reaktor

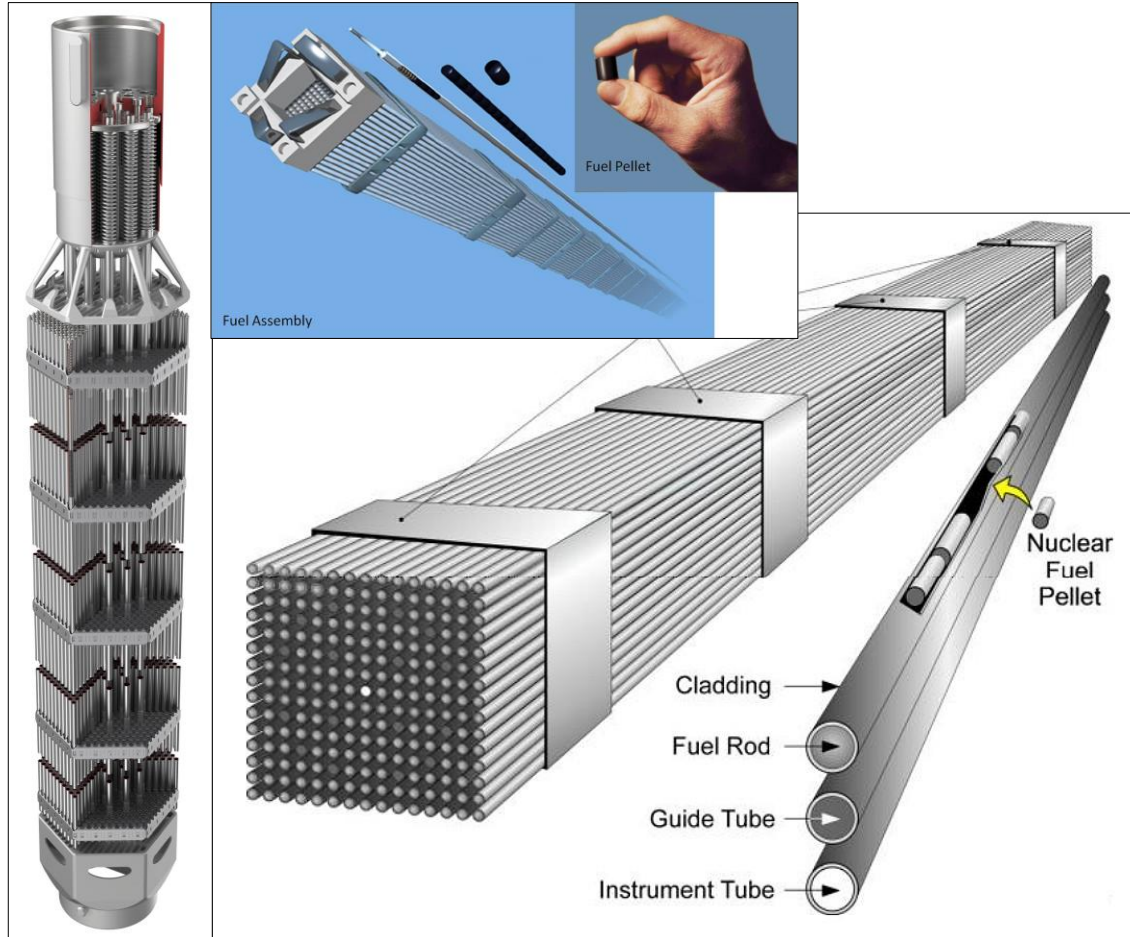


50-80 cm 3-7 m

# Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny

## Jaderná elektrárna

## Výzkumný reaktor



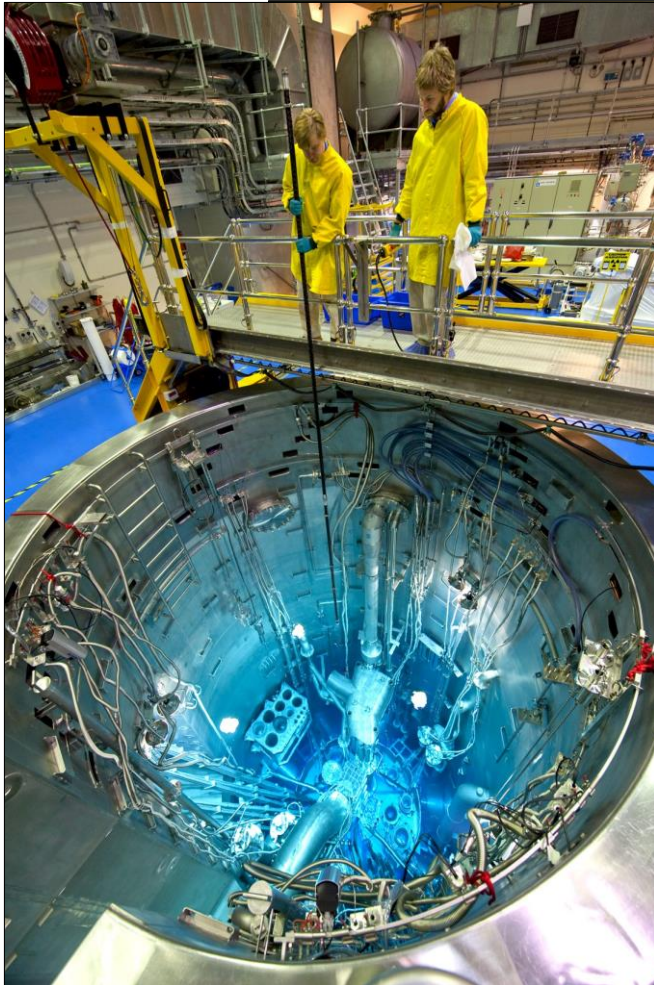
# Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny

parametr	Temelín VVER-1000	Reaktor LVR-15	Školní reaktor VR-1
tepelný výkon	3120 MWt	10 MWt	100 W
elektrický výkon	1078 MWe	---	---
výška reaktorové nádoby	19,2 m	5,76 m	4,2 m
průměr reaktorové nádoby	4,14 m	2,3 m	2,3 m
výška aktivní zóny (paliva)	3,53 m	60 cm	60 cm
obohacení paliva	4-5 %	19,7 %	19,7 %
počet palivových článků v reaktoru	163	28	18
počet proutků/trubek v palivovém článku	312	6-8	6-8
průměr palivového článku	23,51 cm	7,15 cm	7,15 cm

# Obsah

- Za všechno může Enrico Fermi
- Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny
- **Jak může výzkumný reaktor vypadat**
- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru
- Výzkumné reaktory v Československu a České republice
- Závěr

# Jak může výzkumný reaktor vypadat



Bazénový reaktor



Reaktor s uzavřenou nádobou



Reaktor s uzavřenou nádobou v bazénu



# Jak může výzkumný reaktor vypadat



Podkritický soubor DELPHI, Holandsko

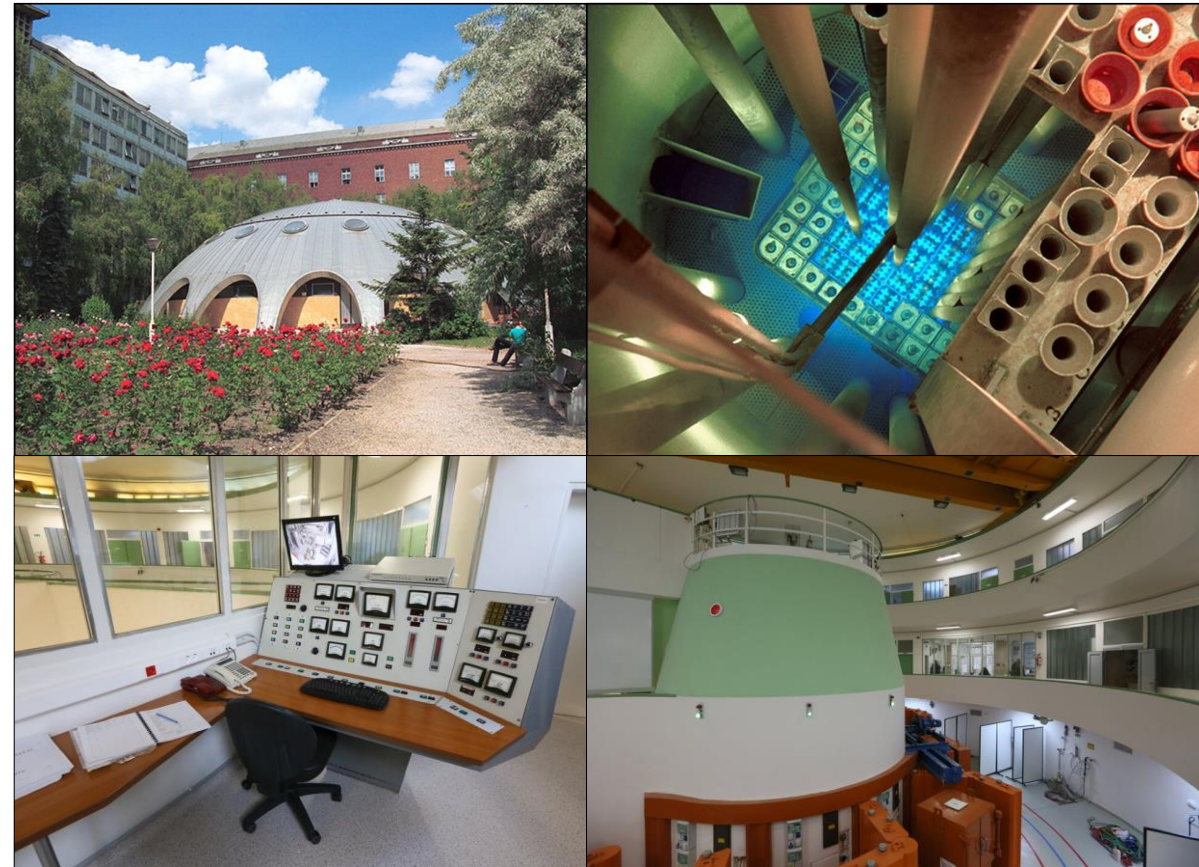


Reaktor typu AGN (mW - 1W)

# Jak může výzkumný reaktor vypadat

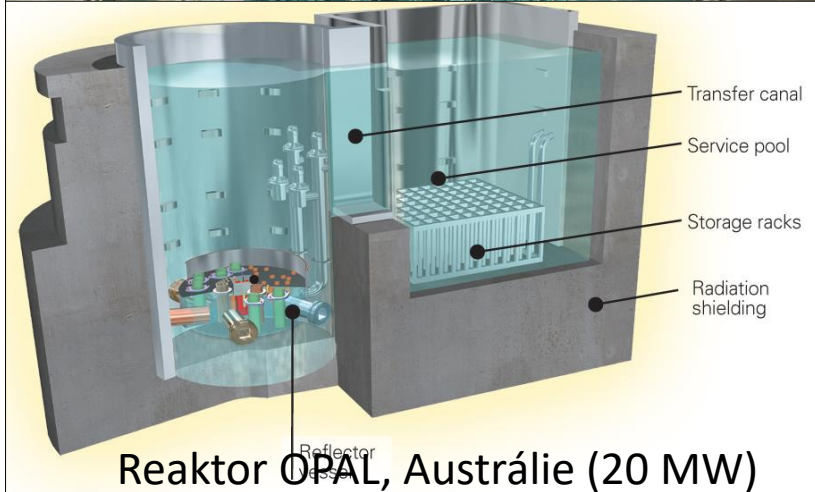


Školní reaktor VR-1, Česká republika (100 W)

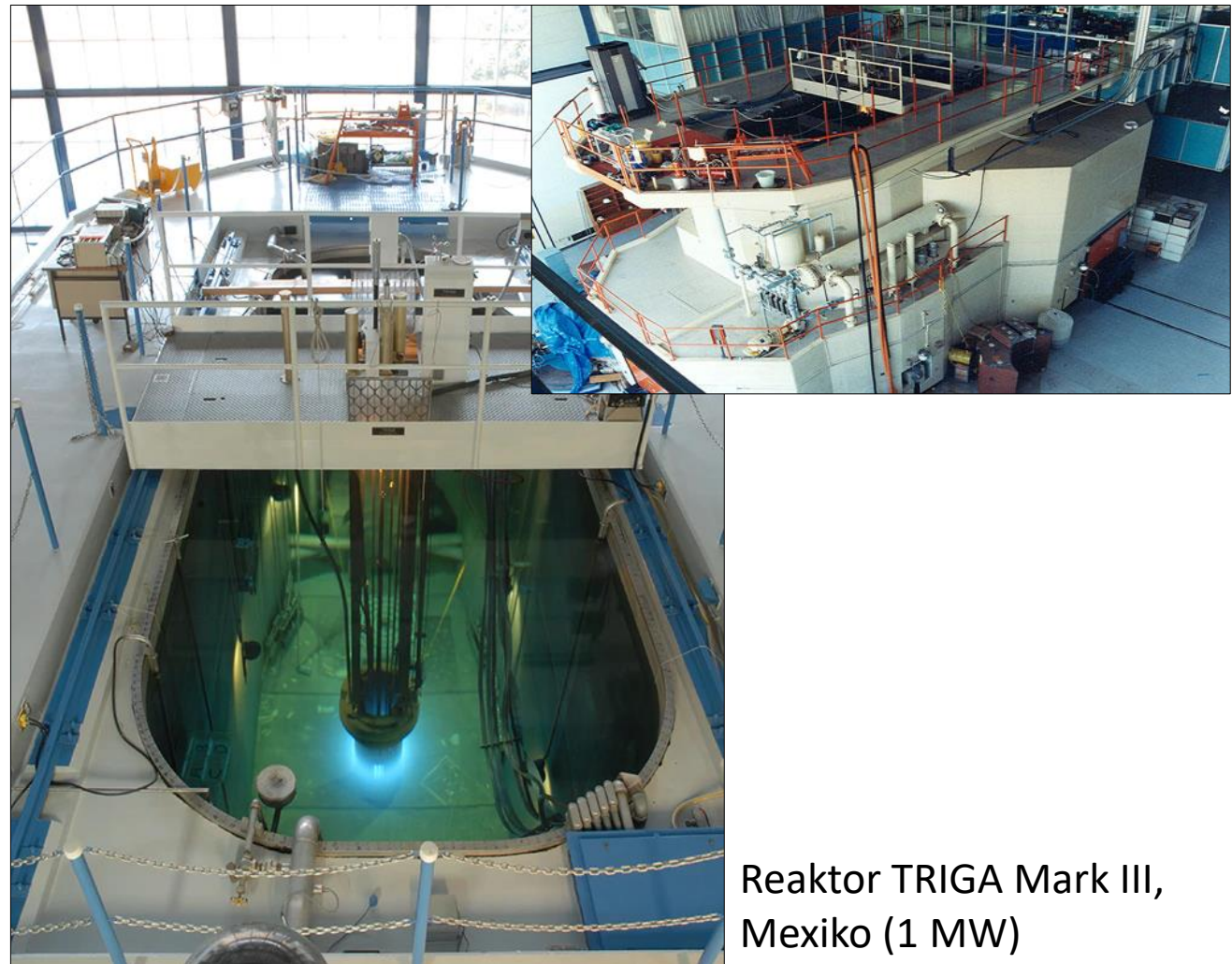


Reaktor BME, Maďarsko (100 kW)

# Jak může výzkumný reaktor vypadat



Reaktor OPAL, Austrálie (20 MW)



Reaktor TRIGA Mark III,  
Mexiko (1 MW)

# Obsah

- Za všechno může Enrico Fermi
- Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny
- Jak může výzkumný reaktor vypadat
- **Co se dá dělat na výzkumném reaktoru**
- Výzkumné reaktory v Československu a České republice
- Závěr

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru?
  - výuka studentů a výcvik pracovníků
  - neutronová aktivační analýza
  - neutronové zobrazování (neutronová radiografie a tomografie)
  - výroba radioizotopů
  - výroba polovodičů (dopování křemíku)
  - barvení drahých kamenů
  - bórová neutronová záchytová terapie
  - výzkum povrchů materiálů
  - datování kamenů a hornin (geochronologie)
  - testování materiálů a jaderných paliv, ....

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Výuka studentů a výcvik pracovníků



Výuka studentů na Školním reaktoru VR-1

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Výuka studentů a výcvik pracovníků



Výuka studentů na Školním reaktoru VR-1

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Výuka studentů a výcvik pracovníků



Výcvik pracovníků a exkurze na Školním reaktoru VR-1

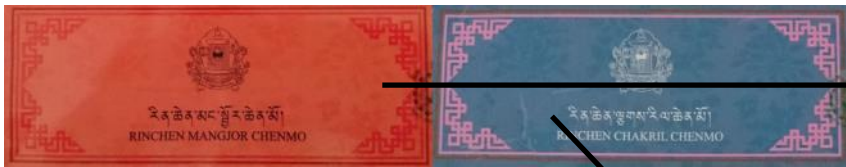


# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

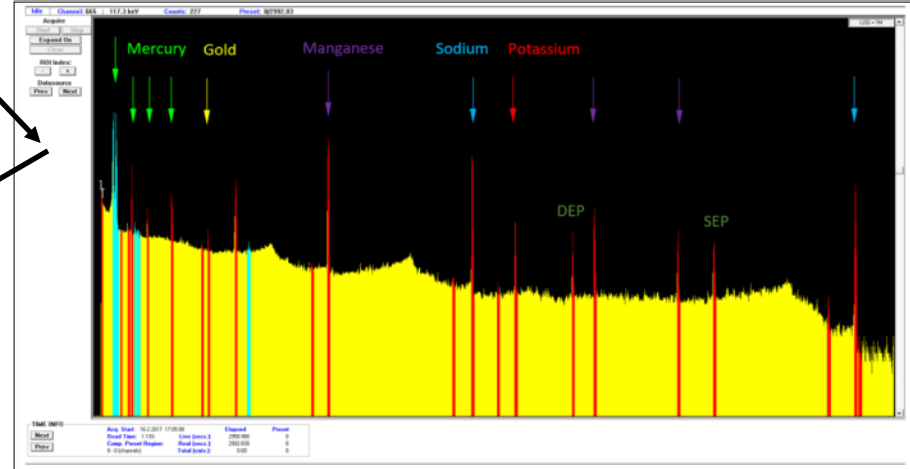
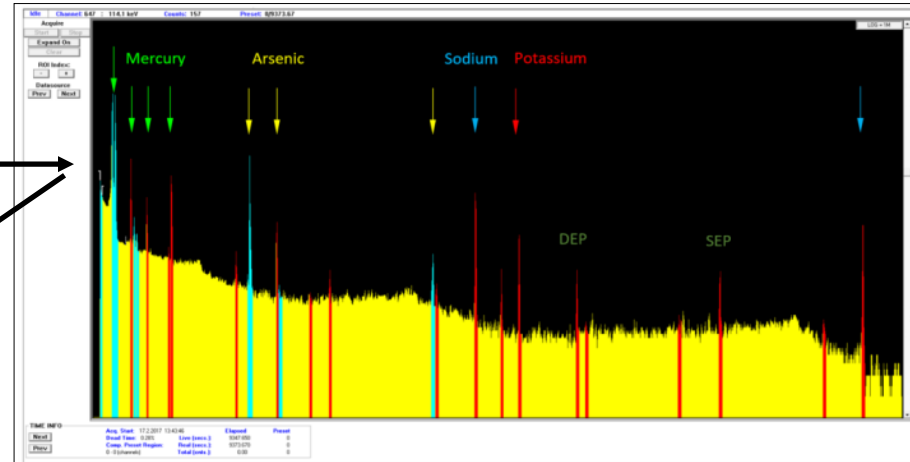
## Neutronová aktivační analýza



### Studium složení tradiční tibetské medicíny



$^{23}\text{Na}$	X	X
$^{26}\text{Mg}$	---	X
$^{37}\text{Cl}$	X	X
$^{41}\text{K}$	X	X
$^{75}\text{As}$	X	---
$^{56}\text{Mn}$	X	X
$^{58}\text{Fe}$	X	---
$^{86}\text{Sr}$	---	X
$^{81}\text{Br}$	---	X
$^{121}\text{Sb}$	X	---
$^{123}\text{Sb}$	X	---
$^{138}\text{Ba}$	---	X
$^{197}\text{Au}$	---	X
$^{196}\text{Hg}$	X	X
$^{196}\text{Hg}$	X	X
$^{198}\text{Hg}$	X	X



# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Neutronová aktivační analýza

### Studium složení starých tibetských mincí



Qualitative analysis of Tibetan coins M1–M4

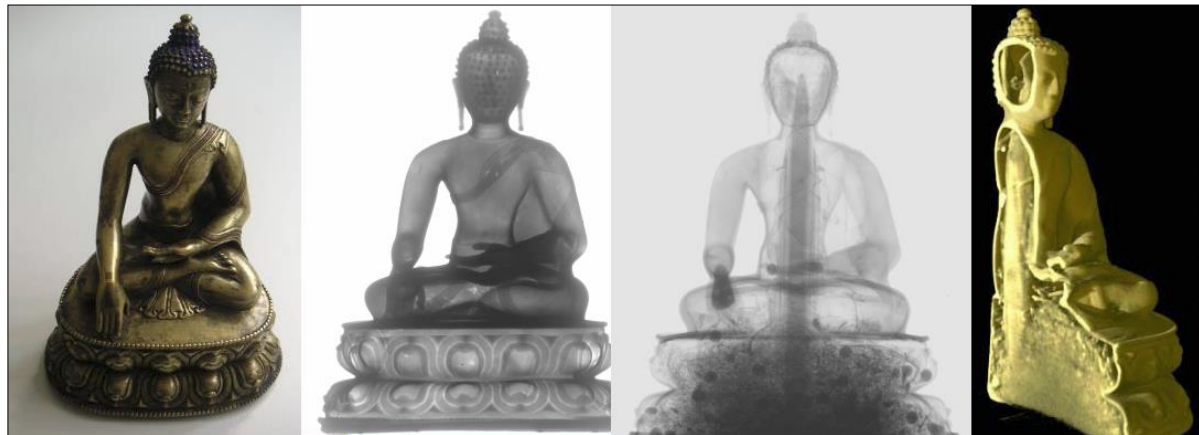
RA-Nuclide	$T_{1/2}$	Coin M1	Coin M2	Coin M3	Coin M4
$^{198}\text{Au}$	2.7 d	✓	✓	✓	
$^{110}\text{Ag}$	250 d	✓	✓		
$^{64}\text{Cu}$	12.7 h	✓	✓	✓	✓
$^{76}\text{As}$	1.1 d	✓	✓	✓	
$^{116\text{m}}\text{In}$	54 m	✓	✓		
$^{65}\text{Zn}$	244 d	✓			
$^{69\text{m}}\text{Zn}$	13.6 h	✓			
$^{56}\text{Mn}$	2.6 h	✓			
$^{122}\text{Sb}$	2.7 d	✓		✓	
$^{124}\text{Sb}$	60.2 d	✓		✓	
$^{24}\text{Na}$	15 h	✓	✓		✓

Quantitative analysis of Tibetan coin M5

Metal	Measured mass	Uncertainty	Abundance
Gold	1.4 mg	5.7 %	0.03 %
Copper	1 545 mg	3.8 %	37.3 %
Silver	2 051 mg	8.3 %	49.5 %
Zinc	23 mg	19.6 %	0.6 %

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Neutronové zobrazování (neutronová radiografie a tomografie)



fotografie

RTG

neutrony

tomografie

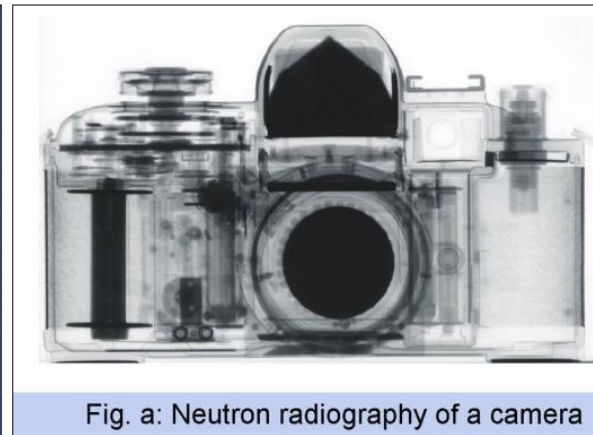


Fig. a: Neutron radiography of a camera

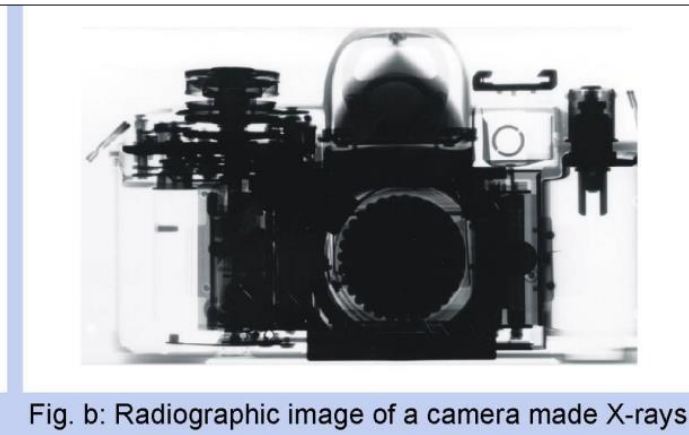


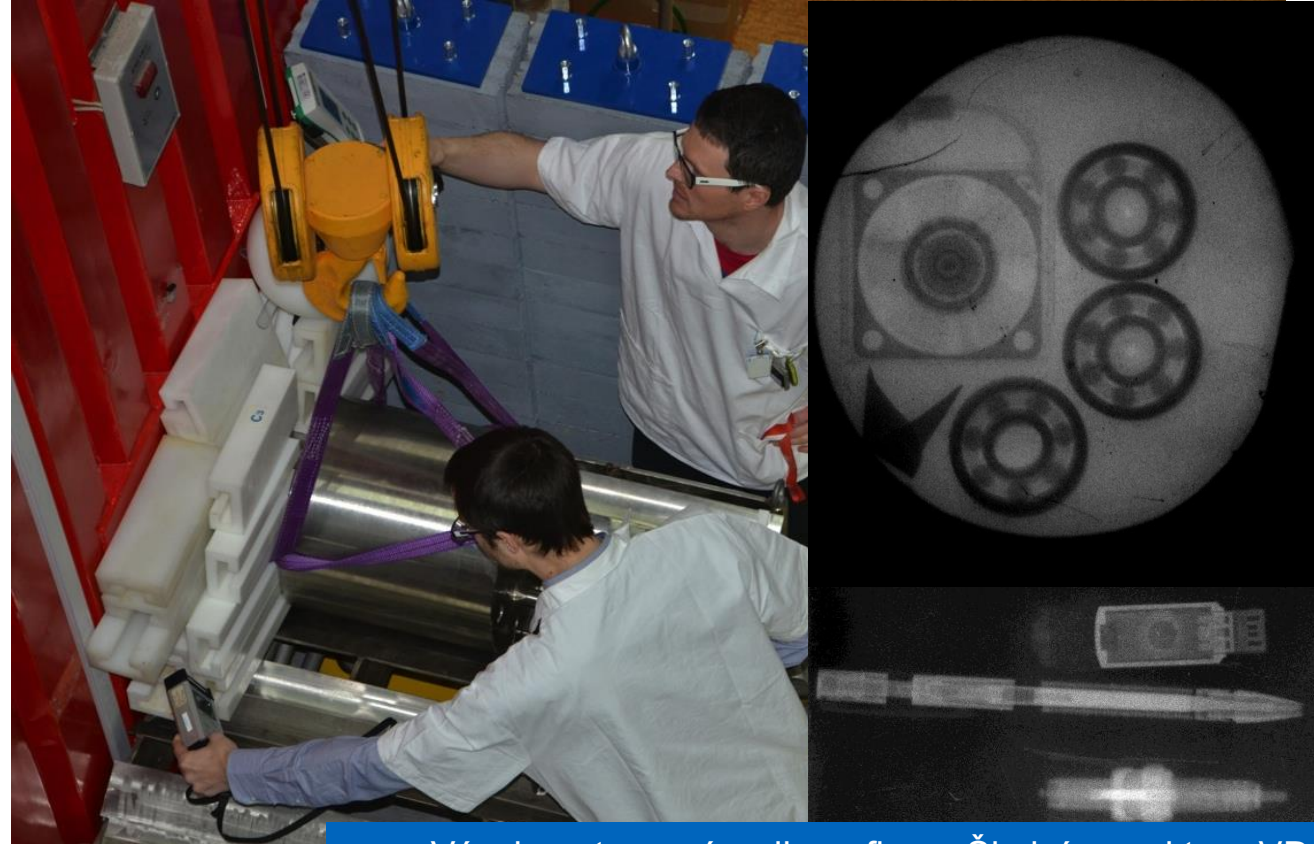
Fig. b: Radiographic image of a camera made X-rays

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Neutronové zobrazování (neutronová radiografie a tomografie)



Zdroj: PSI Švýcarsko



Vývoj neutronové radiografie na Školním reaktoru VR-1

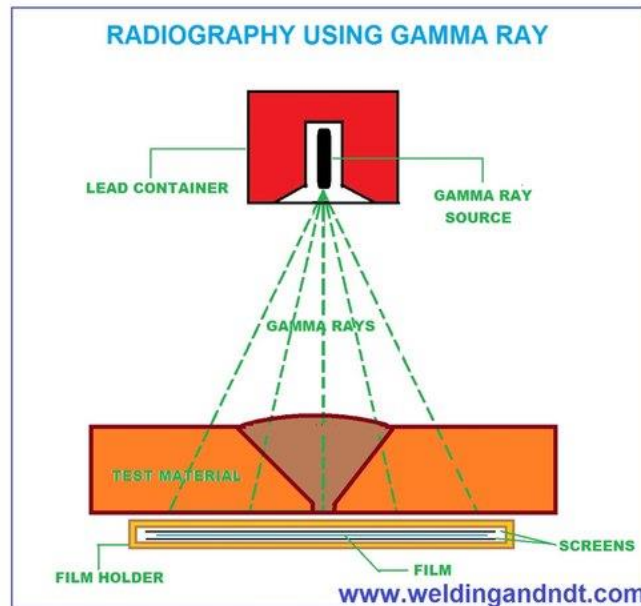
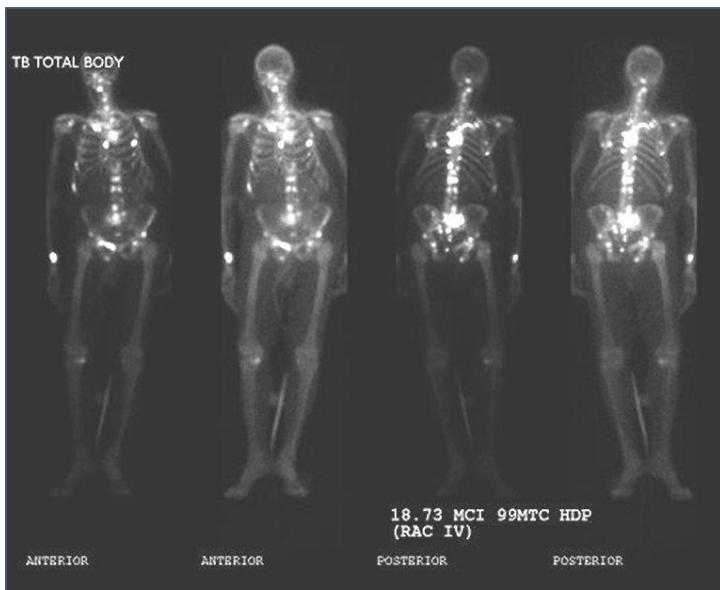
# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Výroba radioizotopů

- Výzkumné reaktory mohou vyrábět široké spektrum radioizotopů, např.:
  - $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Tm}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ...
- Radioizotopy z výzkumných reaktorů se používají v:
  - průmyslu
  - medicíně
  - zemědělství
  - ochraně kulturních památek
  - výzkumu apod.

# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

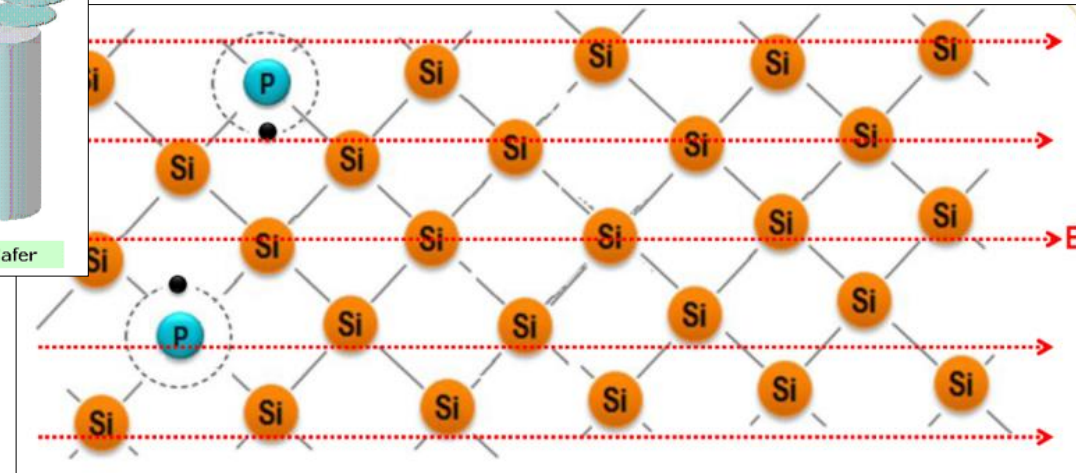
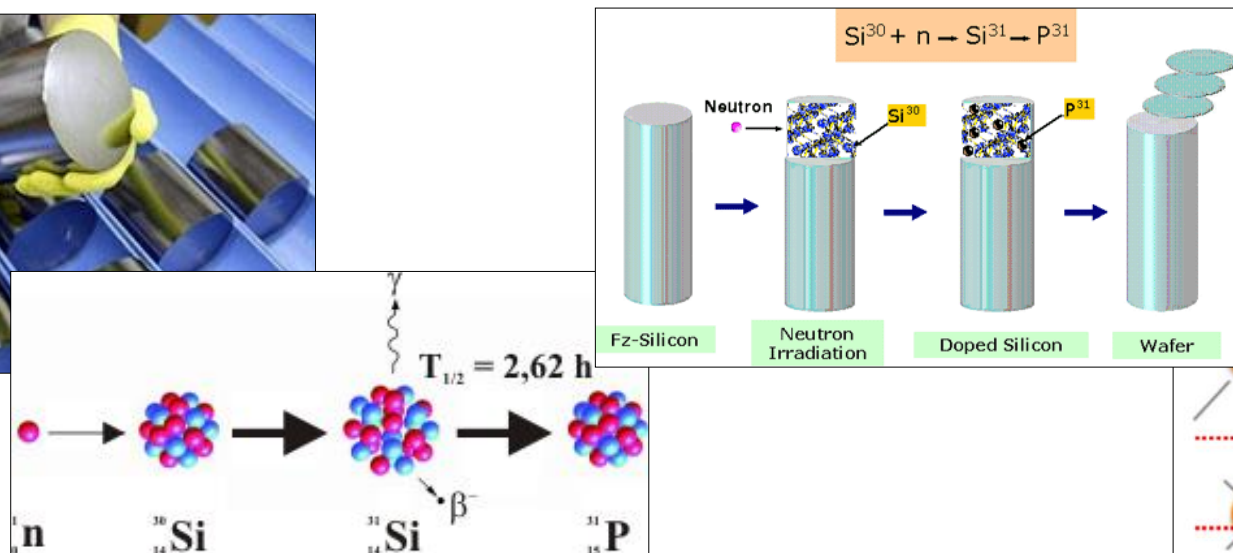
## Výroba radioizotopů



# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Výroba polovodičů (dopování křemíku)

- Křemík je čtyř valenční, ale fosfor je pěti valenční
- Když z křemíku vznikne fosfor, tak ten se svými čtyřmi valenčními elektrony napojí do křemíkové mřížky a pátý elektron zůstane volný
- Volný elektron může vést nábor a mění nevodič v polovodič



# Co se dá dělat na výzkumném reaktoru

## Barvení drahých kamenů

- Některé drahé kameny po ozáření neutrony změní barvu
- Ve výzkumných reaktorech se nejčastěji ozařuje topas
- Z bezbarvého kamenu působením neutronů vzniká modrý drahý kámen
- Po ukončení ozařování musí zůstat kameny v tzv. vymíracích prostorech až do doby než odezní doprovodné gama záření (několik měsíců)





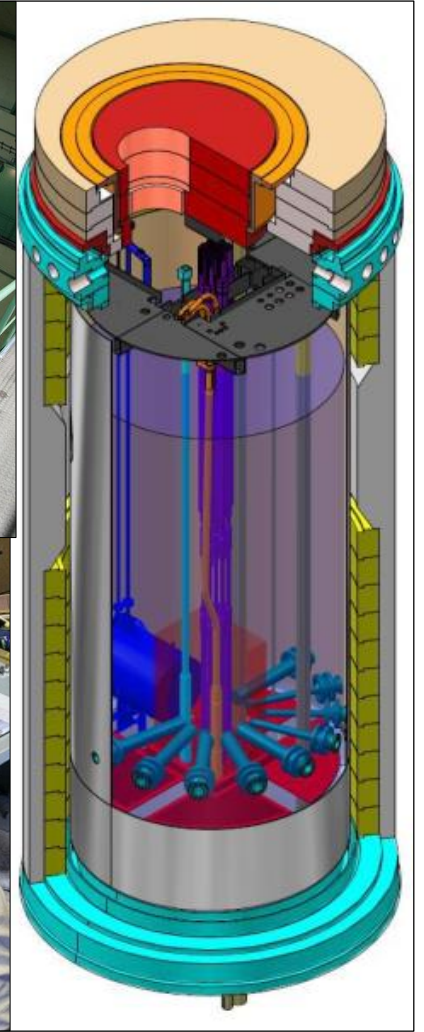
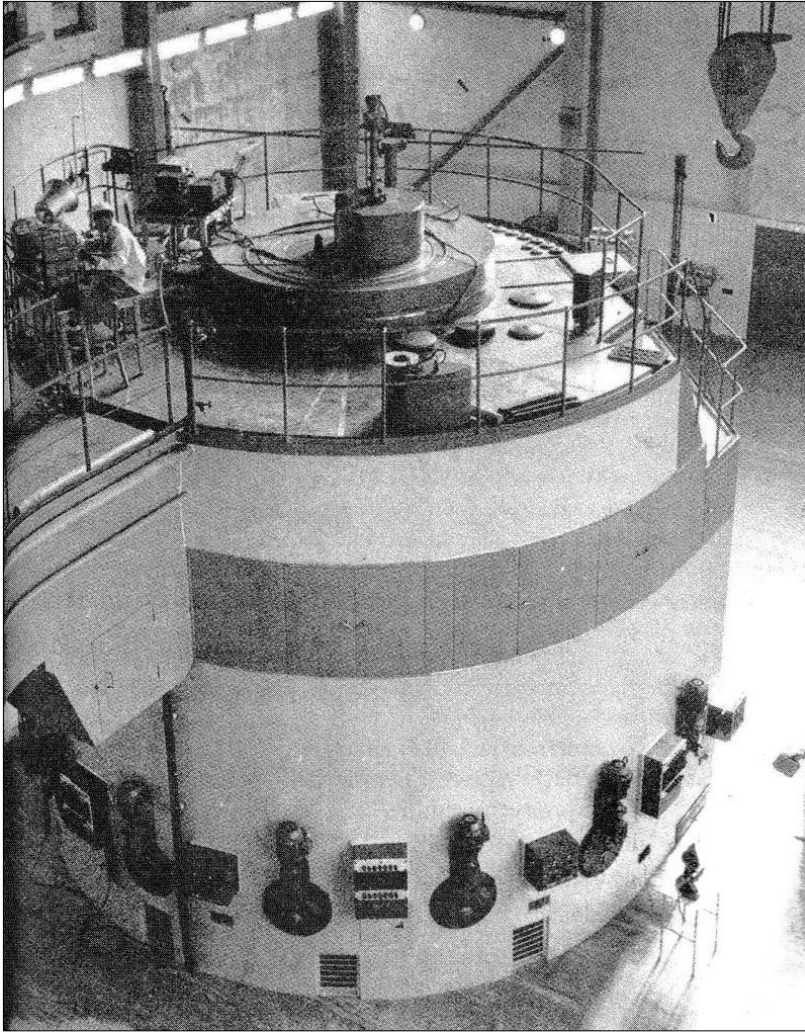
# Obsah

- Za všechno může Enrico Fermi
- Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny
- Jak může výzkumný reaktor vypadat
- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru
- **Výzkumné reaktory v Československu a České republice**
- Závěr

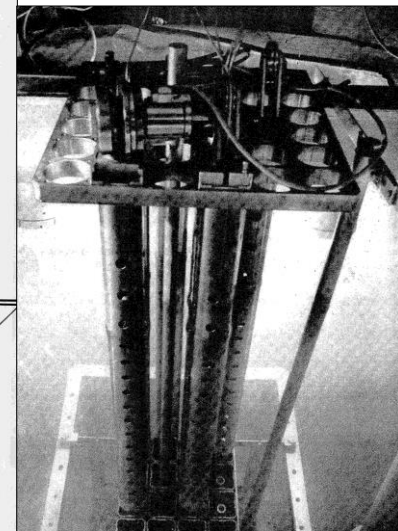
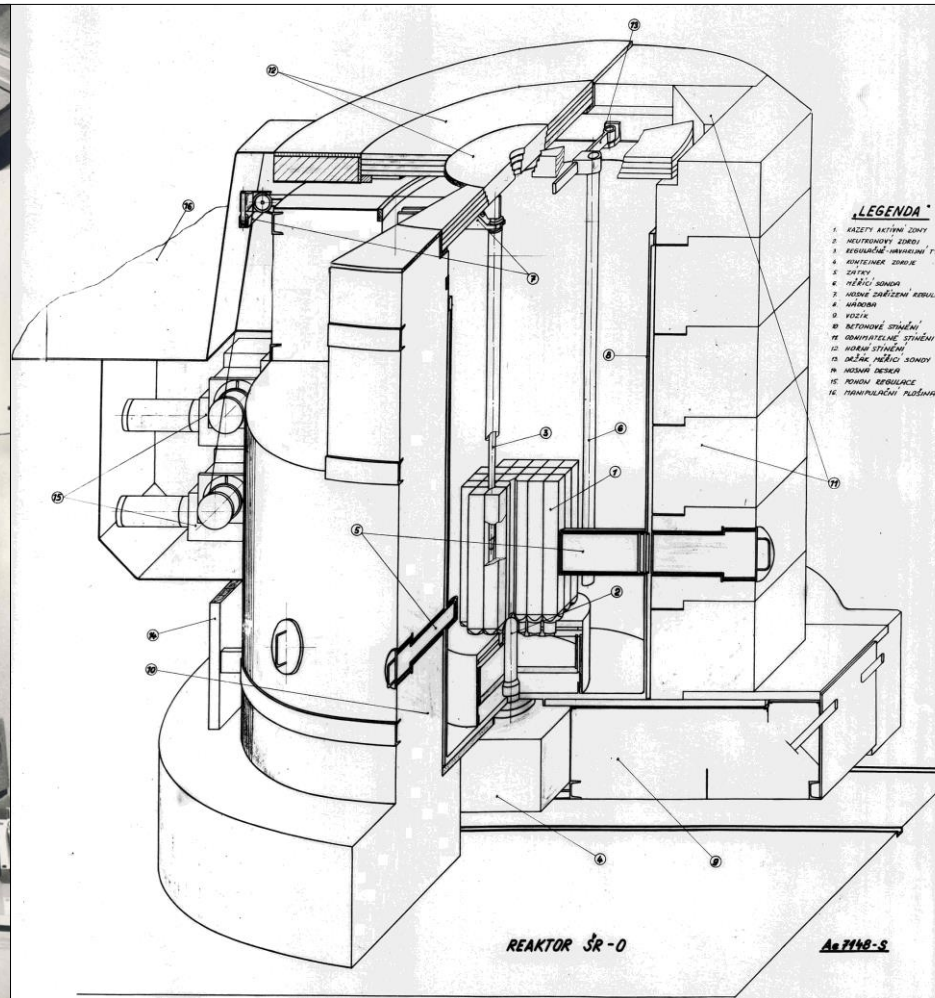
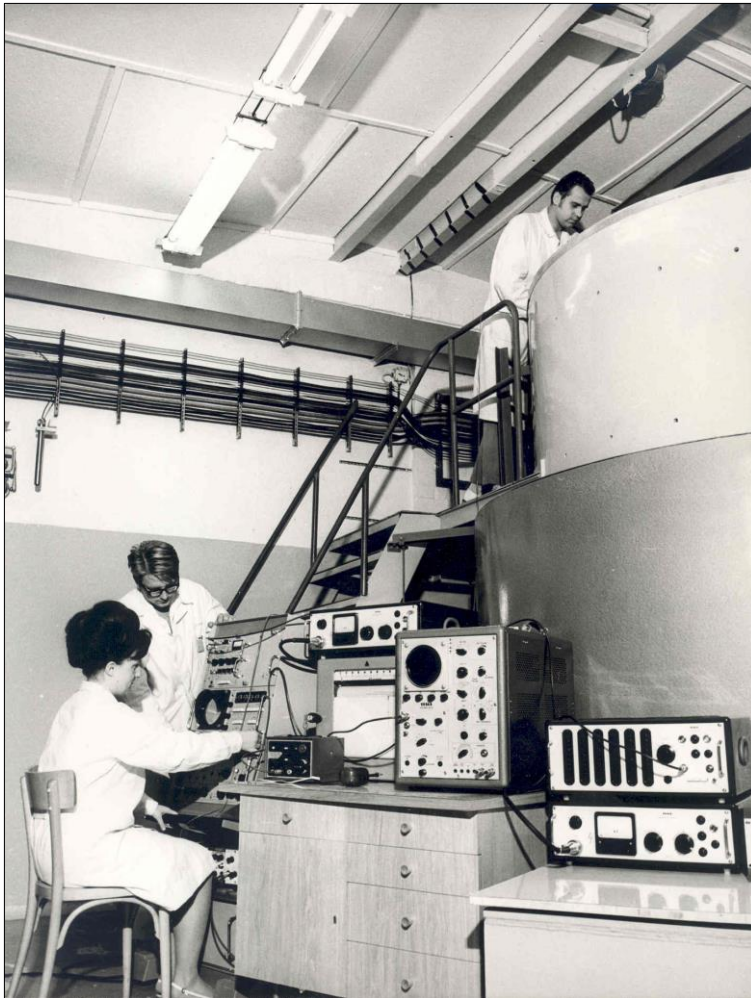
# Výzkumné reaktory v Československu a České republice

Pč	Označení	Název	Provozovatel	Výkon	V provozu
1	VVR-S/LVR-15	Výzkumný reaktor VVR-S/LVR-15	ÚJV Řež / CV Řež	2 MW	do roku 1957
2	ŠR-0	Reaktor Škoda ŠR-0	Škoda Plzeň	1 kW	1971-1979
3	TR-0	Těžkovodní reaktor TR-0	ÚJV Řež	300 W	1972-1979
4	ŠR-0B	Podkritický soubor ŠR-0B	Škoda Plzeň + ČVUT FJFI	---	1973-1982
5	LR-0	Lehkovodní reaktor LR-0	ÚJV Řež / CV Řež	1 kW	od roku 1982
6	VR-1	Školní reaktor VR-1	ČVUT FJFI	100 W	od roku 1990
7	VR-2	Podkritický reaktor VR-2	ČVUT FJFI	---	ve výstavbě

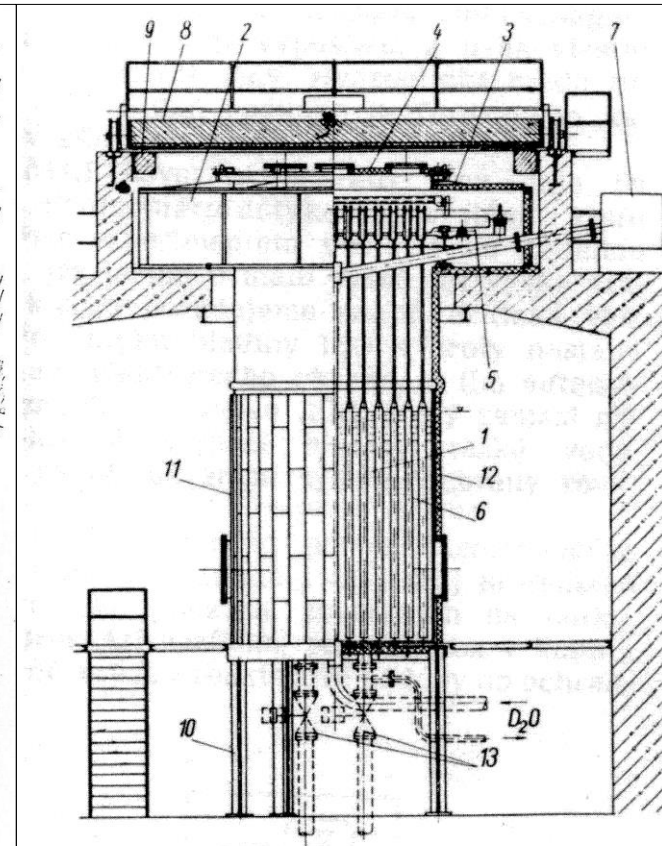
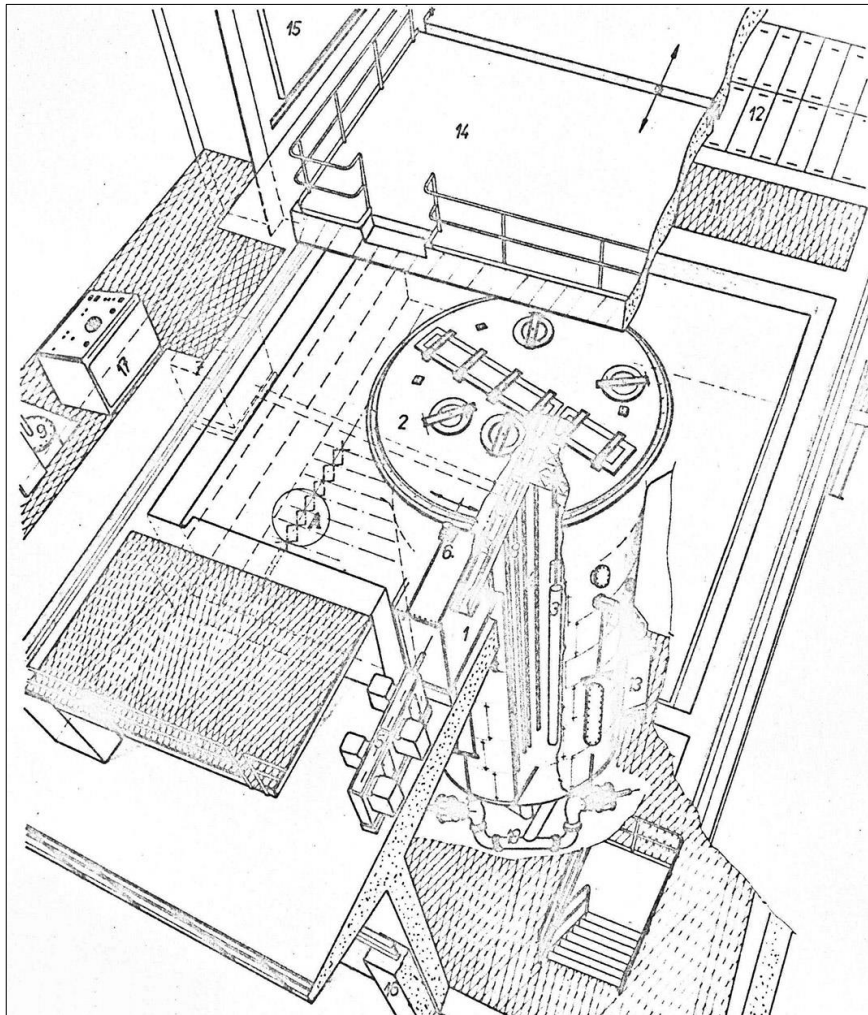
# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



# Výzkumné reaktory v Československu a České republice

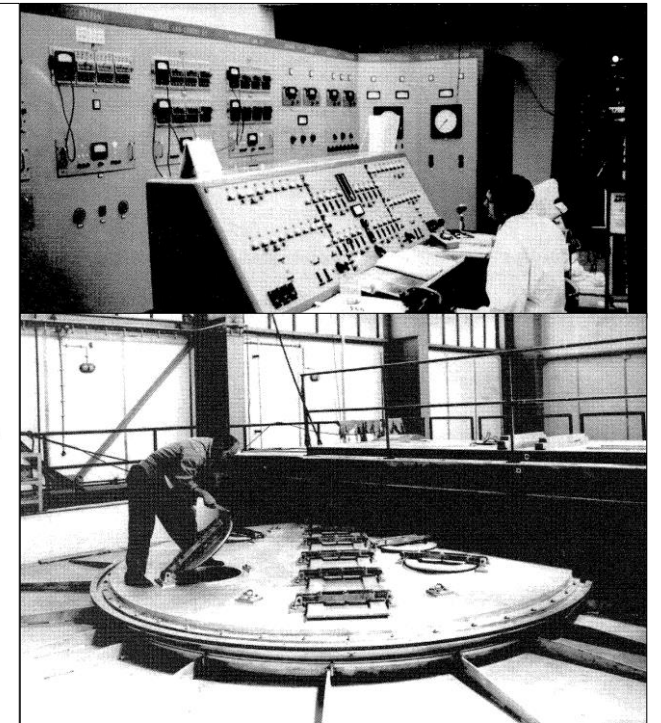


# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



Schematický řez nádobou reaktoru TR-0

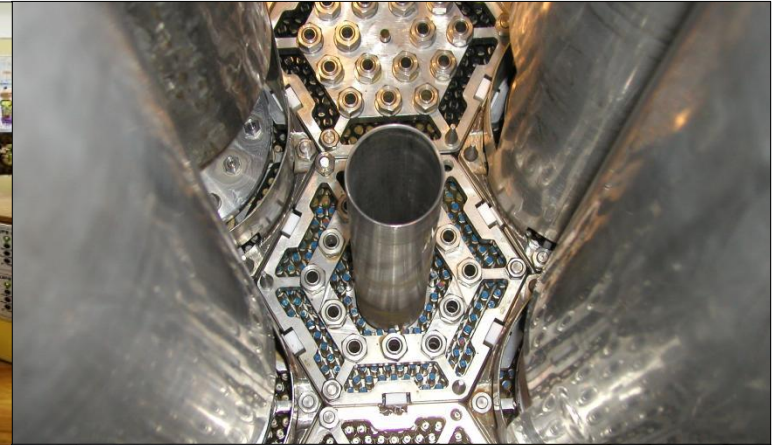
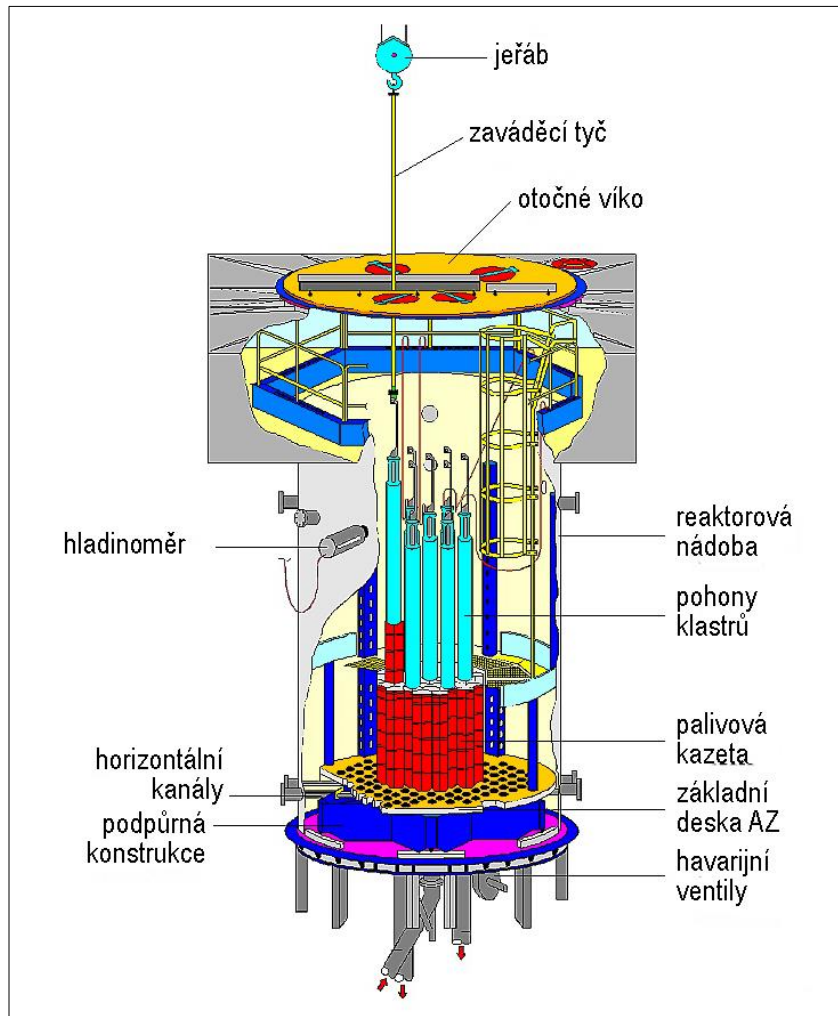
1 – aktivní zóna, 2 – horní část nádoby, 3 – odnímatelné víko, 4 – otočné víko, 5 – nosná mříž palivových článků, 6 – palivové články, 7 – kontejner neutronového zdroje, 8 – pojízdné stínicí plošiny, 9 – vyjímatelné stínicí bloky, 10 – ocelový nosný rošt, 11 – kadmiové obložení, 12 – tepelná izolace, 13 – havarijní ventily.



# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



# Výzkumné reaktory v Československu a České republice

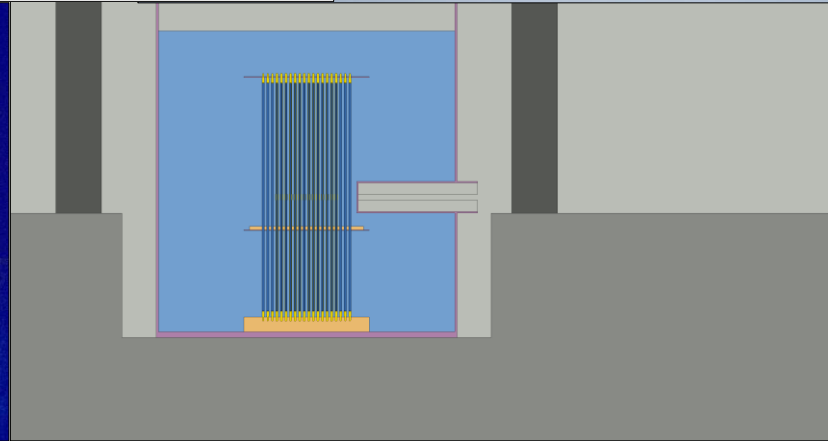
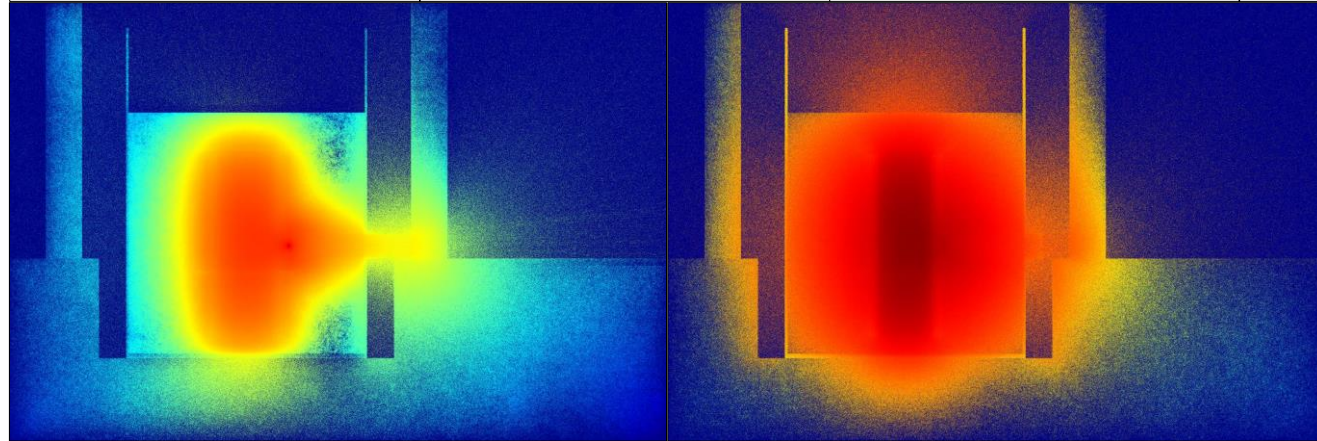
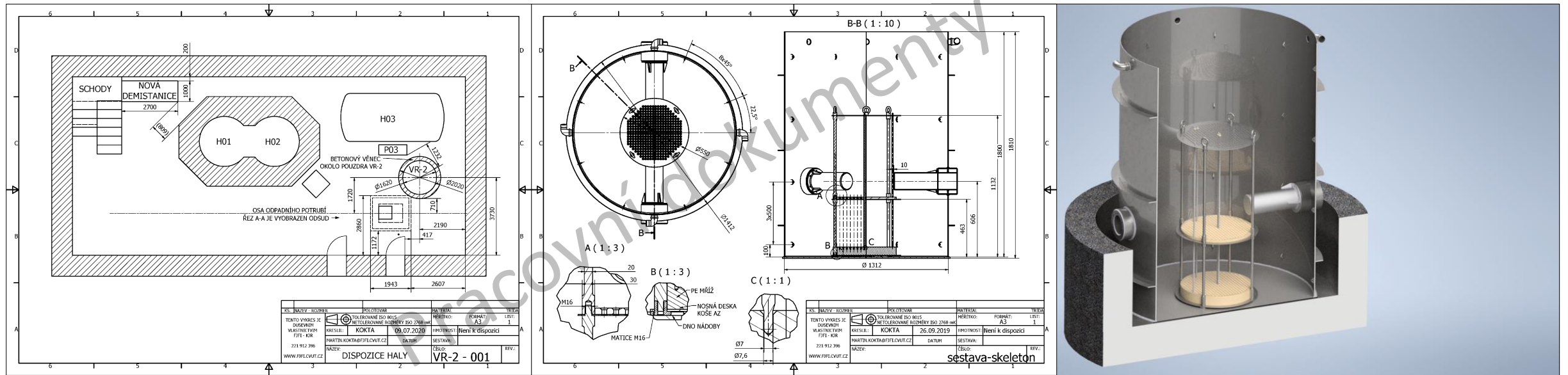




# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



# Výzkumné reaktory v Československu a České republice



# Obsah

- Za všechno může Enrico Fermi
- Výzkumné reaktory a jaderné elektrárny
- Jak může výzkumný reaktor vypadat
- Co se dá dělat na výzkumném reaktoru
- Výzkumné reaktory v Československu a České republice
- Závěr

# Závěr

- Již sedmdesát, od doby, kdy byly uvedeny do provozu první jaderné reaktory ve čtyřicátých letech minulého století, hrály a hrají výzkumné reaktory významnou úlohu ve vývoji jaderných technologií, ve výzkumu a vývoji neutronových aplikací a také v jaderném vzdělávání a výcviku.
- Neutrony z výzkumných reaktorů lze využít v průmyslu, medicíně, zemědělství, stejně tak jako archeologii nebo v projektech zaměřených na zachování kulturního dědictví a v různých zdravotních či potravinových projektech.