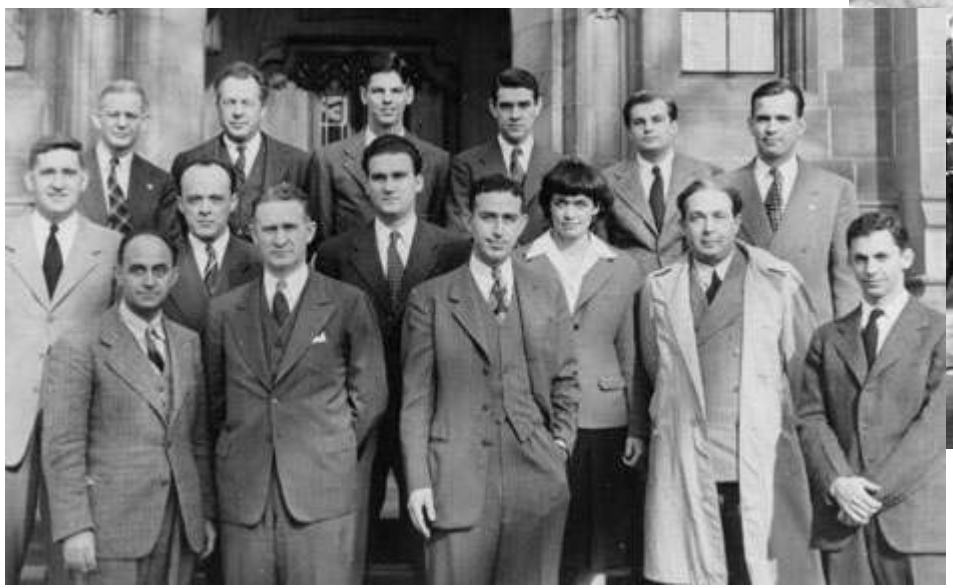
JADERNÉ ELEKTRÁRNY

---

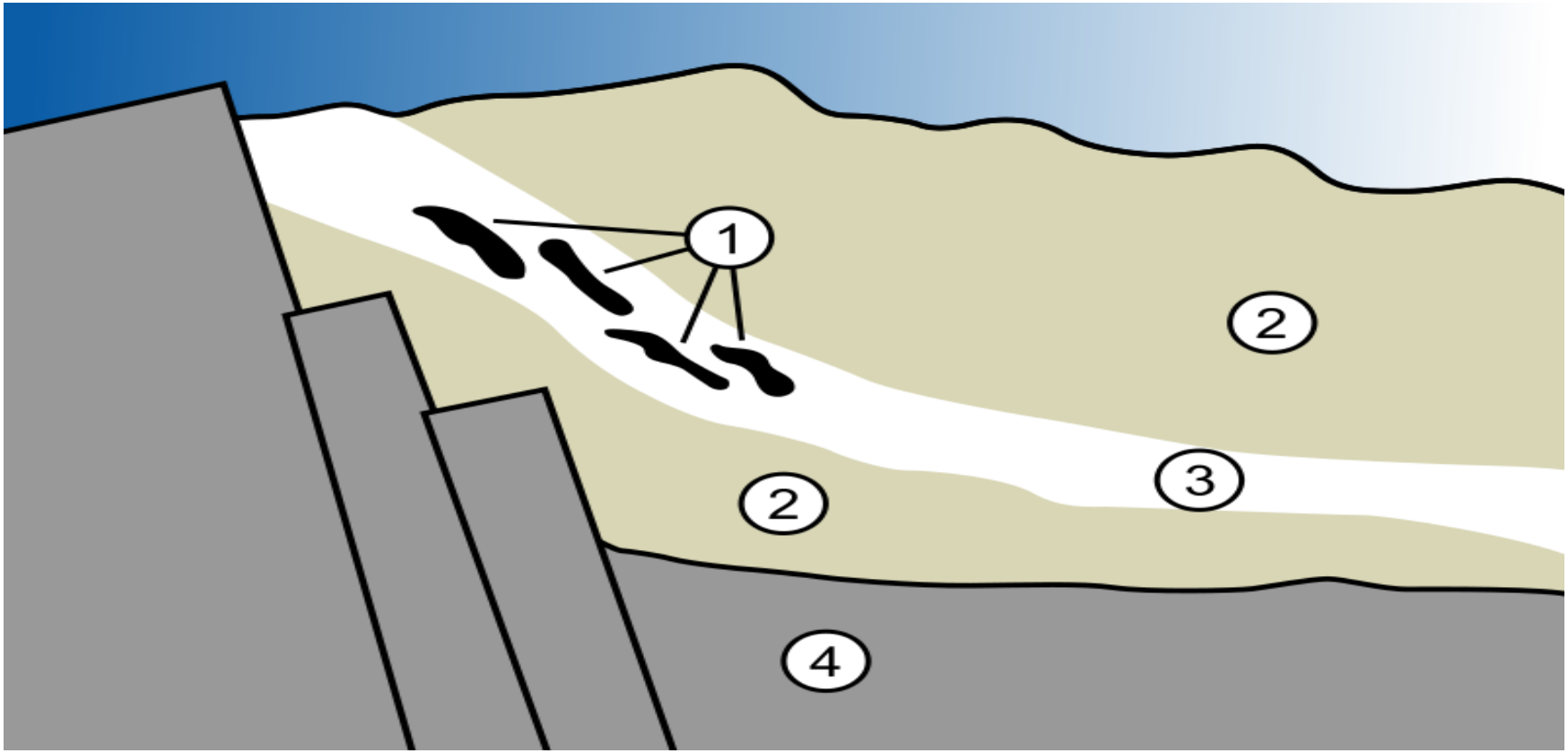
2. 12. 1942



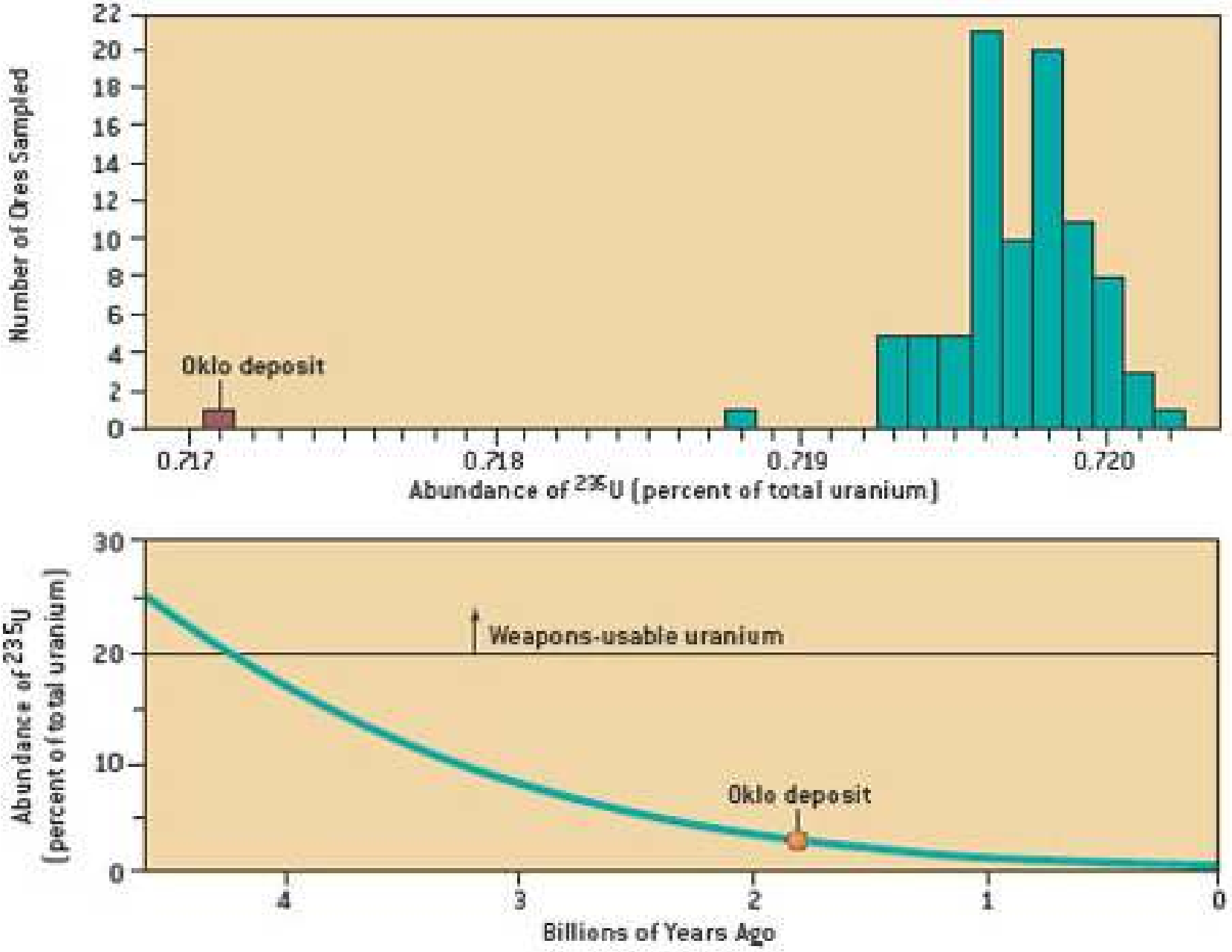
Oklo – přírodní reaktor

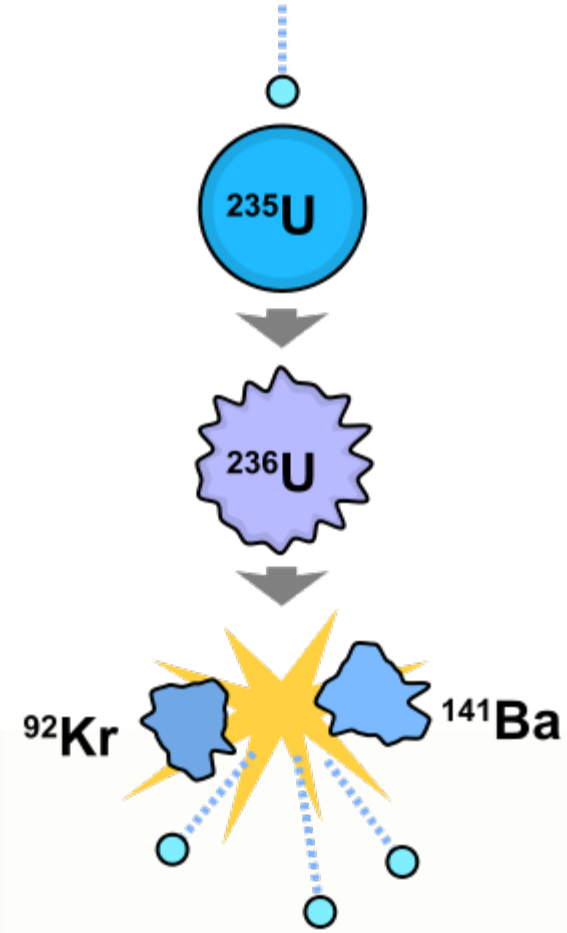
Zajímavost:

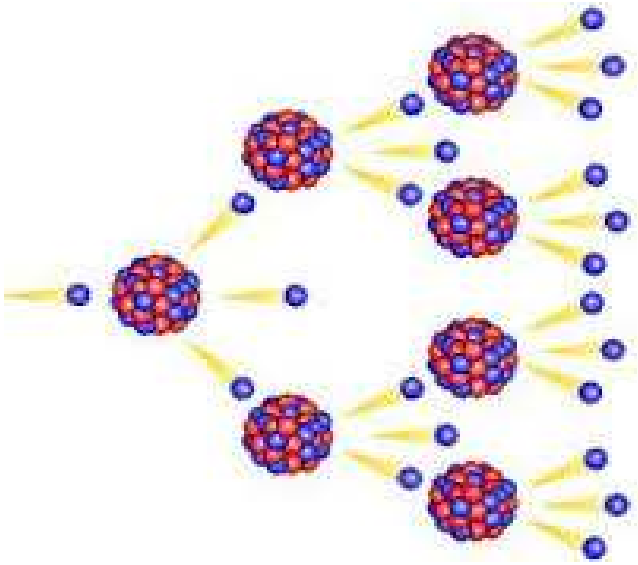
- Přírodní reaktor v Oklu (Gabon)
- Asi před 2 Gy (pracoval po dobu minimálně 1 milionu let) – „obohacení uranu“ přes 10 % a hodně vody



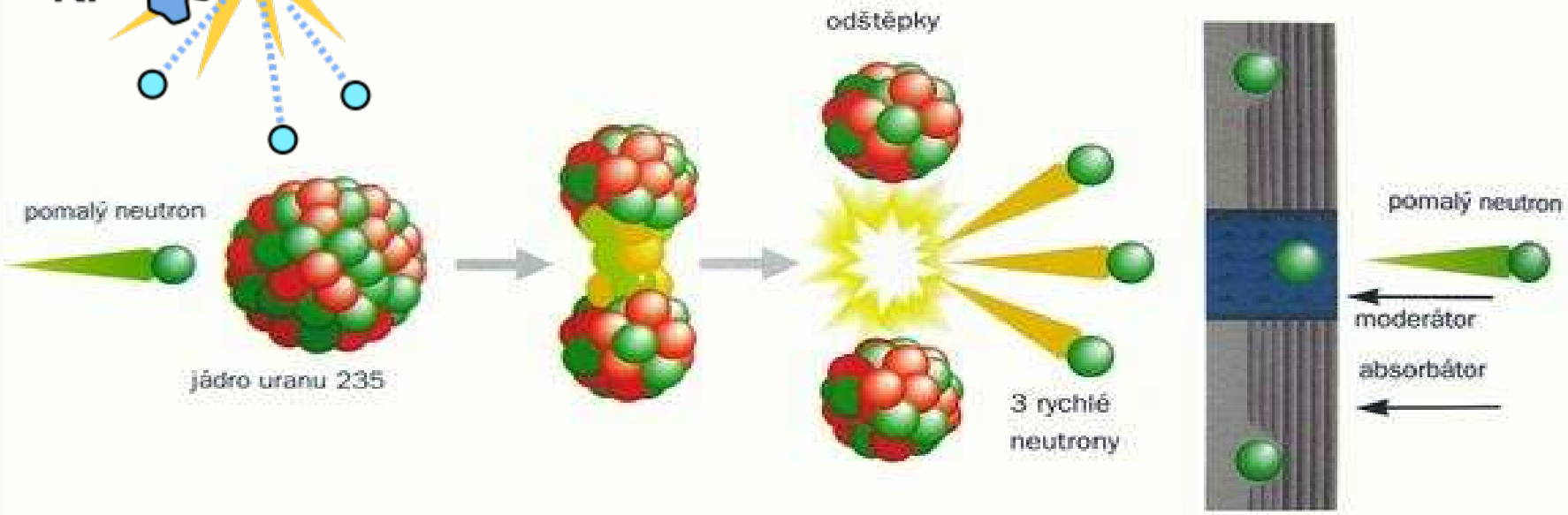
AFRICA
Gabon
GABON
Oklo
Okelobondo
Bangombe
200 kilometers


Number of Ores Sampled
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Oklo deposit
0.717
0.718
0.719
0.720
Abundance of ^{235}U (percent of total uranium)
Abundance of ^{235}U (percent of total uranium)
30
20
10
0
Weapons-usable uranium
Oklo deposit
4
3
2
1
0
Billions of Years Ago





$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{93}_{36}Kr + ^{140}_{56}Ba + 3^{1}_{0}n$$



Těžba rudy

- V hlubinných nebo povrchových dolech
- Klasicky nebo chemicky (vyluhuje se z hornin kyselinou)
- Těží se již od obsahu 0,1 % uranu
- V ČR těžba cca 408 tun ročně

- **Naleziště:** oblast Jáchymova (v době 2.sv.války)
  Příbram, Stráž pod Ralskem. Dolní Rožínka na Jihlavsku

- Nyní pokračuje omezená těžba uranu jen v Dolní Rožínce
- Za dobu existence průmyslové těžby se u nás vytěžilo 109 000 tun uranu

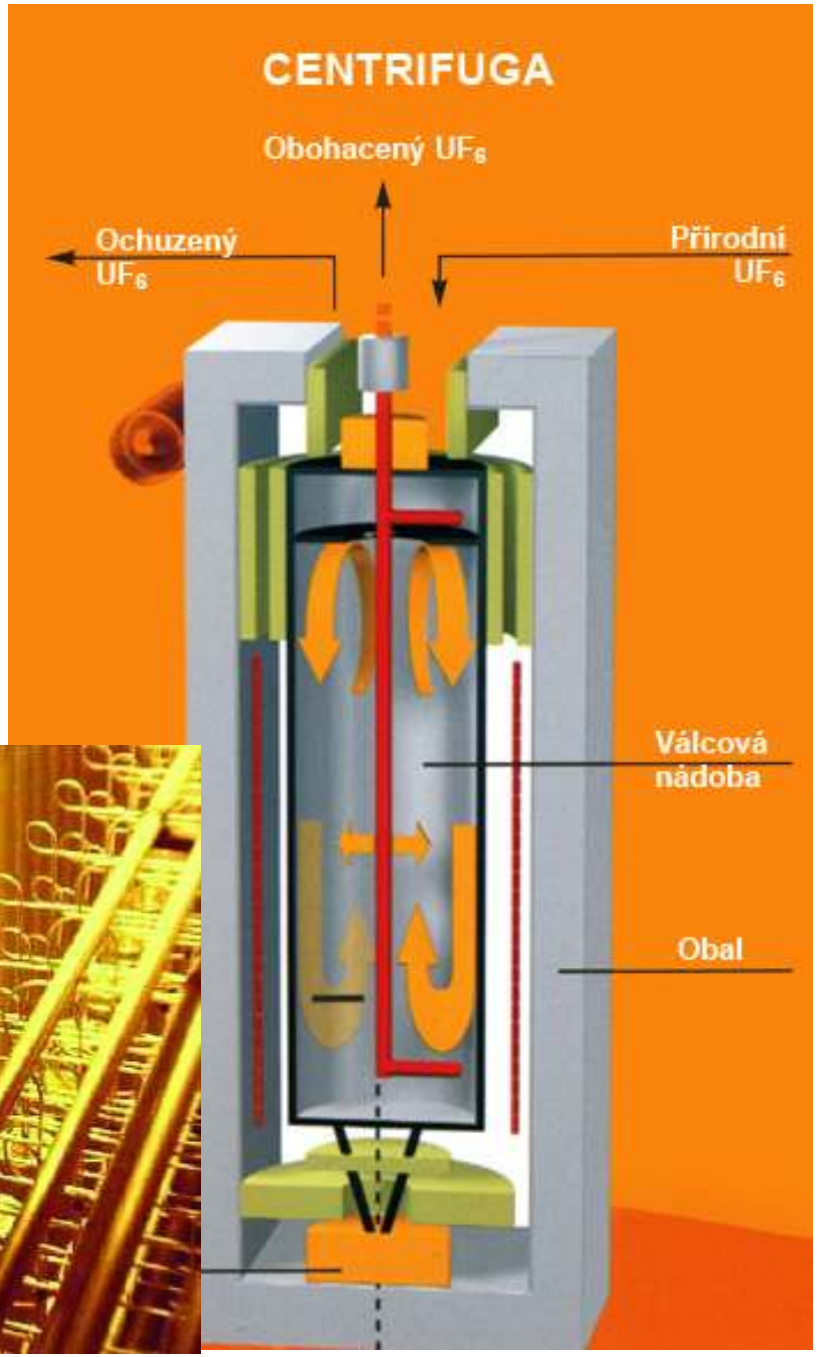
Úprava uranu

- Vytěžená ruda je nejprve rozdrcena
- Jemně rozemleta a poté se vylouhuje roztokem kyseliny sírové
- Po vysrážení se z roztoku získá koncentrát žluté barvy ve formě oxidu uranu
- Uranový koncentrát se odesílá do konverzního závodu na vyčištění a konverzi na plynný hexafluorid uranu.
- Ten pak slouží jako vsázka do obohacovacího závodu.

Obohacovací závod

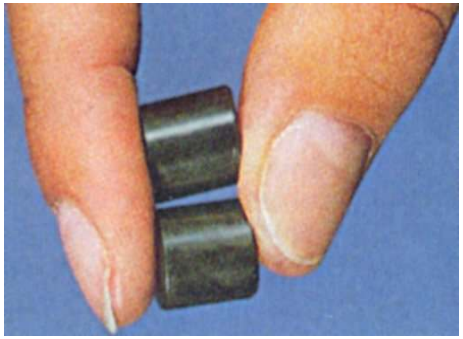
Přírodní uran:	0,71 % štěpitelného izotopu
Slabě obohacený:	1 – 5 %
Středně obohacený:	5 – 20 %
Silně obohacený:	20 a více %

- V obohacovacích závodech se zvýší obsah štěpitelného izotopu na přibližně 2 až 5%.
- Z původní vsázky uranu se obohatí asi 1/6, zbytek tvoří tzv. ochuzený uran obsahující zejména neštěpitelný uran.
- Obohacený plynný hexafluorid uranu se ve speciálních kontejnerech dopravuje do závodů na výrobu palivových článků.


CENTRIFUGA
Obohacený UF_6
Ochuzený UF_6
Přírodní UF_6
Válcová nádoba
Obal

Palivové pruty a jejich výroba

- Hexafluorid se v závodu na výrobu pal. proutků přemění na pevný oxid uraničitý (UO_2)
- z OU_2 se vyrábí malé tablety(pelety)
- Energetický obsah jedné pelety je $1{,}87.10^4$ MJ a může nahradit 1,6 t hnědého uhlí, 880 kg černého uhlí nebo 438 kg benzínu.
- Tato energie se z pelety získává v průběhu 4 let.
- Pelety se ukládají do několik metrů dlouhých trubek vyrobených ze speciálních slitin především Zirkonia (tvoří bariéru proti úniku štěpných produktů).
- Palivové tyče se montují do palivových kazet

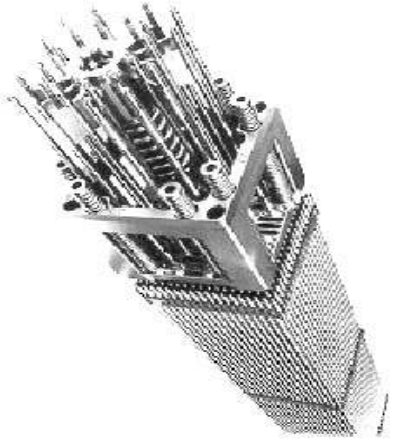


- **Palivový článek (peleta)**

- Průměr 1,5 cm
- Každá váží asi 4,8 g
- Hermeticky odolný kovový obal
- V aktivní zóně reaktoru je jich asi 19,2 milionů pelet

- **Palivový proutek**

- Průměr pal. tyče:9,1 mm
- Počet pelet v pal. proutku: 386 ks
- Hmotnost oxidu uraničitého v 1 tyči:1575 g



- **Kazeta**

- Počet palivových tyčí v kazetě: 317 ks
- Počet kazet v reaktoru: 163 ks

JAK FUNGUJE JADERNÁ ELEKTRÁRNA ?

Energie se získává štěpením jader ^{235}U neutrony v jaderném reaktoru.

Palivo ho obsahuje asi 4%.

Uran je zde ve formě oxidu uraničitého UO_2

a je **v reaktoru umístěn v palivových článcích**.

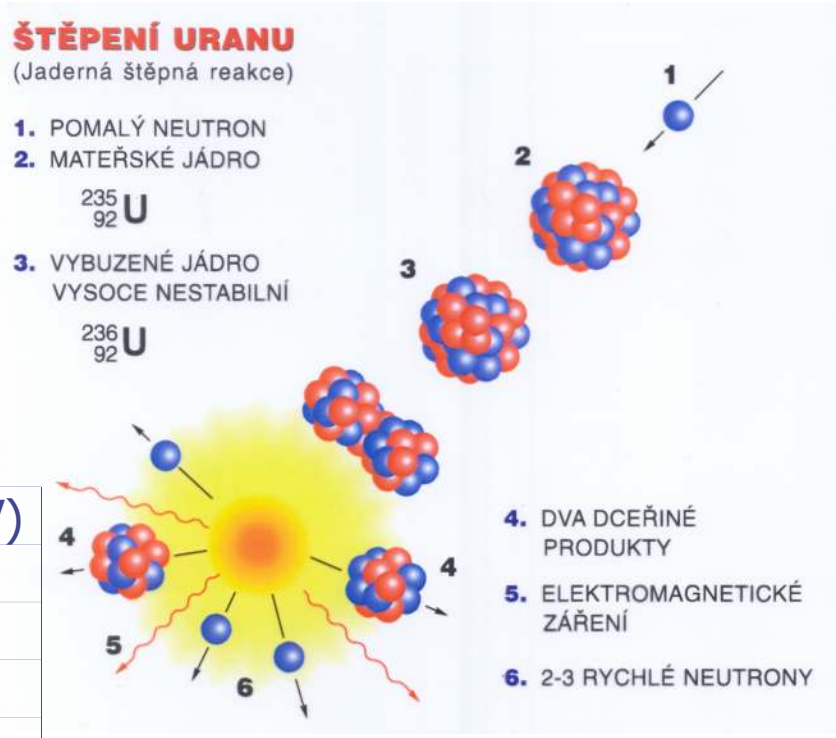
Každý článek je tvořen **proutky.**

V reaktoru jsou regulační kazety s palivovou částí.

Teplo, které v aktivní zóně reaktoru vzniká štěpením jader uranu, je odváděno chladicí demineralizovanou vodou

Palivový cyklus (doba, za kterou se všechny kazety s palivem postupně vymění) **je 5 let.**

Jaderný rea

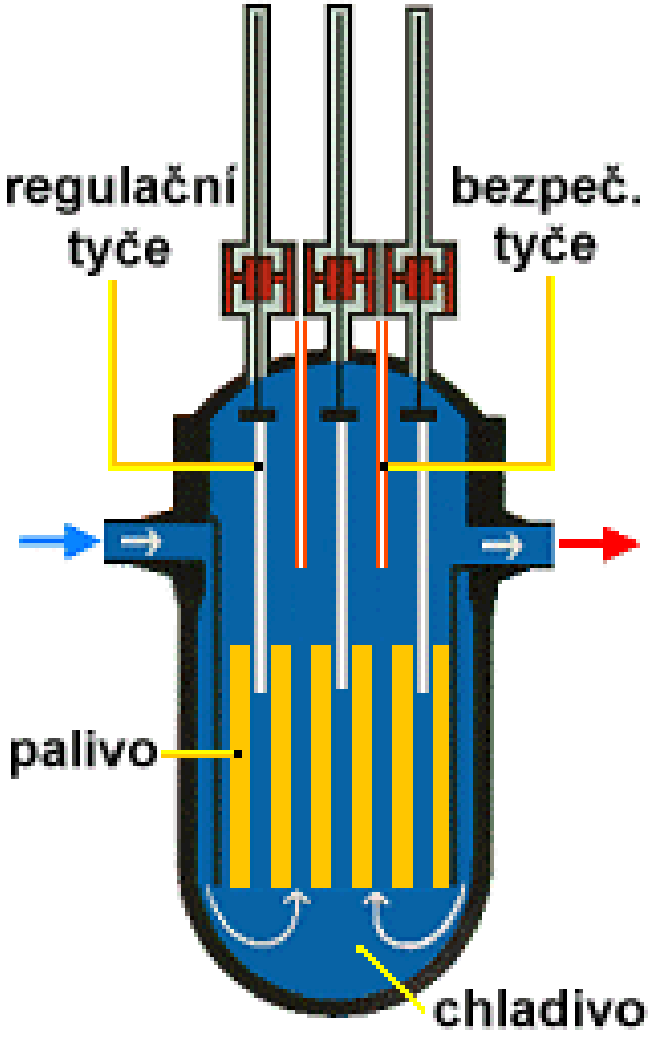


- Štěpení jaderného paliva
  (U233, U235, Pu239, Pu241)

produkt	energie (MeV)
fragmenty štěpení	166,2±1,3
neutrony	4,8±0,1
okamžité γ-fotony	8,0±0,8
β-částice produktů štěpení	7,0±0,3
γ-záření produktů štěpení	7,2±1,1
neutrina	9,6±0,5
celkem	202,8±0,4

- 1 eV = 0,160210 aJ (attojoule) = $0{,}16021 \times 10^{-18}$ J
- 1 W = $3{,}1 \times 10^{10}$ rozštěpených jader/s
- 1 g štěpitelného materiálu obsahuje asi $2{,}5 \times 10^{21}$ jader - 1g obsahuje asi 1 MWd tepelné energie

Jaderný reaktor



- Palivo
- Chladivo
- Moderátor neutronů
- Konstrukční materiály
- Regulační a havarijní tyče – absorbátory neutronů

Jaderné reaktory

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení dle IAEA	Příklady JE
Tepelné	Lehkovodní	H_2O	**PWR** tlakovodní reaktor	PWR Chooz B1,2 - Francie
				VVER Temelín 1,2 – ČR
			BWR varný reaktor	Shika 1,2 -Japonsko Olkiluoto1,2 - Finsko
	Grafitové	CO_2	**GCR** plynem chlazený reaktor	Hartelpool 1,2 – V. Británie
			AGR zdokonalený, plynem chlazený reaktor	Torness 1,2 - Velká Británie
		He	(HTGR vysokoteplotní reaktor)	(AVR Jülich - Německo)
		H_2O	**LWGR** grafitový reaktor s tlakovými kanály	Ignalina (1),2, - Litva Smolenská 1-3, - Rusko
	Těžkovodní	D_2O	**PHWR** těžkovodní reaktor Candu	Cernavoda 1,2- Rumunsko Darlington 1-4, - Kanada
		H_2O	(HWLWR těžkovodní reaktor chlazený obyčejnou vodou)	(Fugen - Japonsko) (Gentilly 1, - Kanada)
		CO_2	(HWGCR těžkovodní chlazený plynem SGHWR)	(A1 J.Bohunice – ČSSR) (Winfrith – Velká Británie)
Rychlé	Není	Na	**FBR** rychlý množivý reaktor	BN-600 - Rusko Monju – Japonsko (Super-Phenix – Francie)

Generace v jaderné energetice

Generace I

První prototypy

- Shippingport
- Dresden
- Magnox

Generace II

Komerční elektrárny

- LWR, PWR, BWR
- VVER, RBMK
- CANDU
- AGR

Generace III

Pokročilé reaktory

- CANDU 6
- System 80+
- AP600

Generace III+

Evoluční změny

- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESBWR

Generace IV

Revoluční změny

- Bezpečná
- Trvale udržitelná
- Ekonomická
- Bezpečná proti zneužití
- Minimum odpadu

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Gen I | Gen II | Gen III | Gen III+ | Gen IV

Bezpečnost

Základní **10 x vyšší** **100 x vyšší** **jako u Gen III**

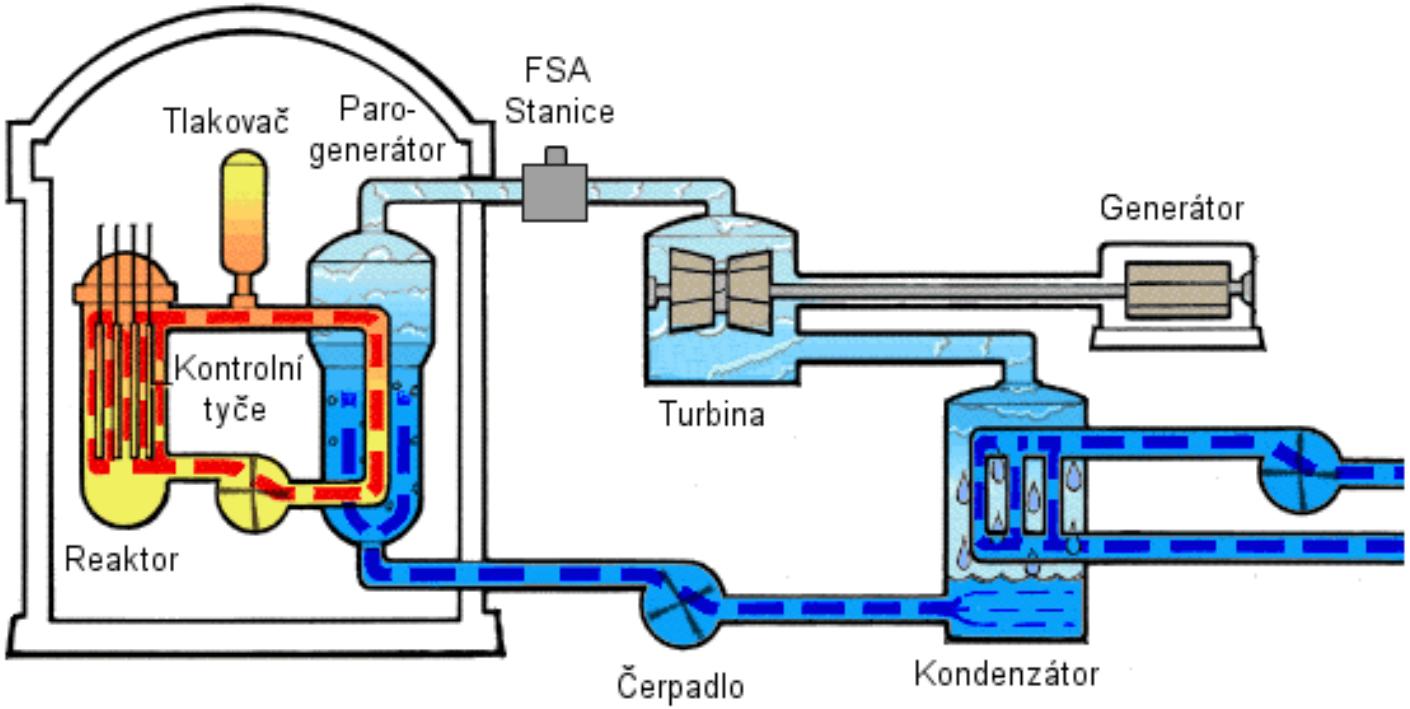
Účinnost [%]

25 – 30 **30 – 33** **30 – 37** **45 - 55**

PRIMÁRNÍ OKRUH

* odvádí energii z reaktoru a přeměňuje ji v tepelnou energii využitelnou v parní turbíně

* ohřívá vodu v parogenerátoru, přeměňuje ji na páru a předává tak teplo sekundárnímu okruhu



* Animace: ZDE

SEKUNDÁRNÍ OKRUH

* Sekundárním okruhem v jaderné elektrárně je nazýván systém zařízení, který umožňuje **přeměnit tepelnou energii páry v mechanickou** energii rotoru parní turbíny

* Rotor (pojmem **rotor** se označují rotující **součásti strojů – el. motor, čerpadlo**) turbíny je spojen s rotorem generátoru, kde se transformuje kinetická energie rotoru na energii elektrickou.

TERCIÁRNÍ OKRUH

* Úkolem terciálního okruhu je vytvořit v kondenzátoru co největší turbínou využitelný podtlak, aby účinnost turbíny byla co nejvyšší.

* **Základními zařízeními tohoto okruhu jsou:**
  - chladící věže
  - oběhová čerpadla
  - potrubí a kanály chladící vody

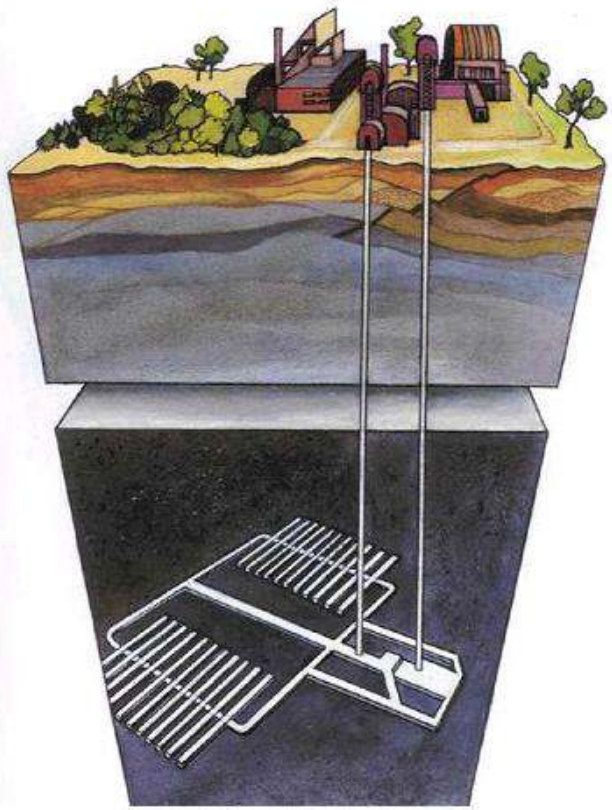
JE v České republice

Parametry jaderných reaktorů		
	JE Dukovany	JE Temelín
typ reaktoru	VVER 440	VVER 1000
tepelný výkon	1375 MW	3000 MW
průměr tlak. nádoby	3,56 m	4,5 m
výška tlak. nádoby	11,8 m	10,9 m
palivové kazety	312 ks	163 ks
hmotnost paliva	42 t	92 t
moderátor a chladivo	obyčejná (lehká) voda	obyčejná (lehká) voda
tlak v reaktoru	12,25 MPa	15,7 MPa
teplota chladiva	267 °C-297 °C	290 °C-320 °C

Dostavba ETE

- 2 bloky v Temelíně + opce na další tři v Evropě bez lokalizace:
  - česko-ruské konsorcium Škoda JS, Atomstrojexport a Gidropress (projekt MIR-1200, Modernized International Reactor)
  - americký Westinghouse (AP1000)
  - francouzská AREVA (EPR™, 1650 MWe)
- Vítěz bude vyhlášen koncem příštího nebo začátkem přespříštího roku.
- Oba temelínské bloky budou mít výkon tisíc až 1700 MWe každý

JADERNÝ ODPAD



- **Jaderný odpad** je materiál, který

má radioaktivní vlastnosti a nemá již další hodnotné využití.

- ***Vyhořelé jaderné palivo*** – které je skladováno po využití v JE a poté uloženo do ochranných kontejnerů a uloženo do podzemí.

Výhody a nevýhody jaderných elektráren

VÝHODY:

* Malé množství paliva
* Malé množství odpadu
* Mnohem menší znečištění prostředí (včetně kontaminace radioaktivními látkami)

NEVÝHODY:

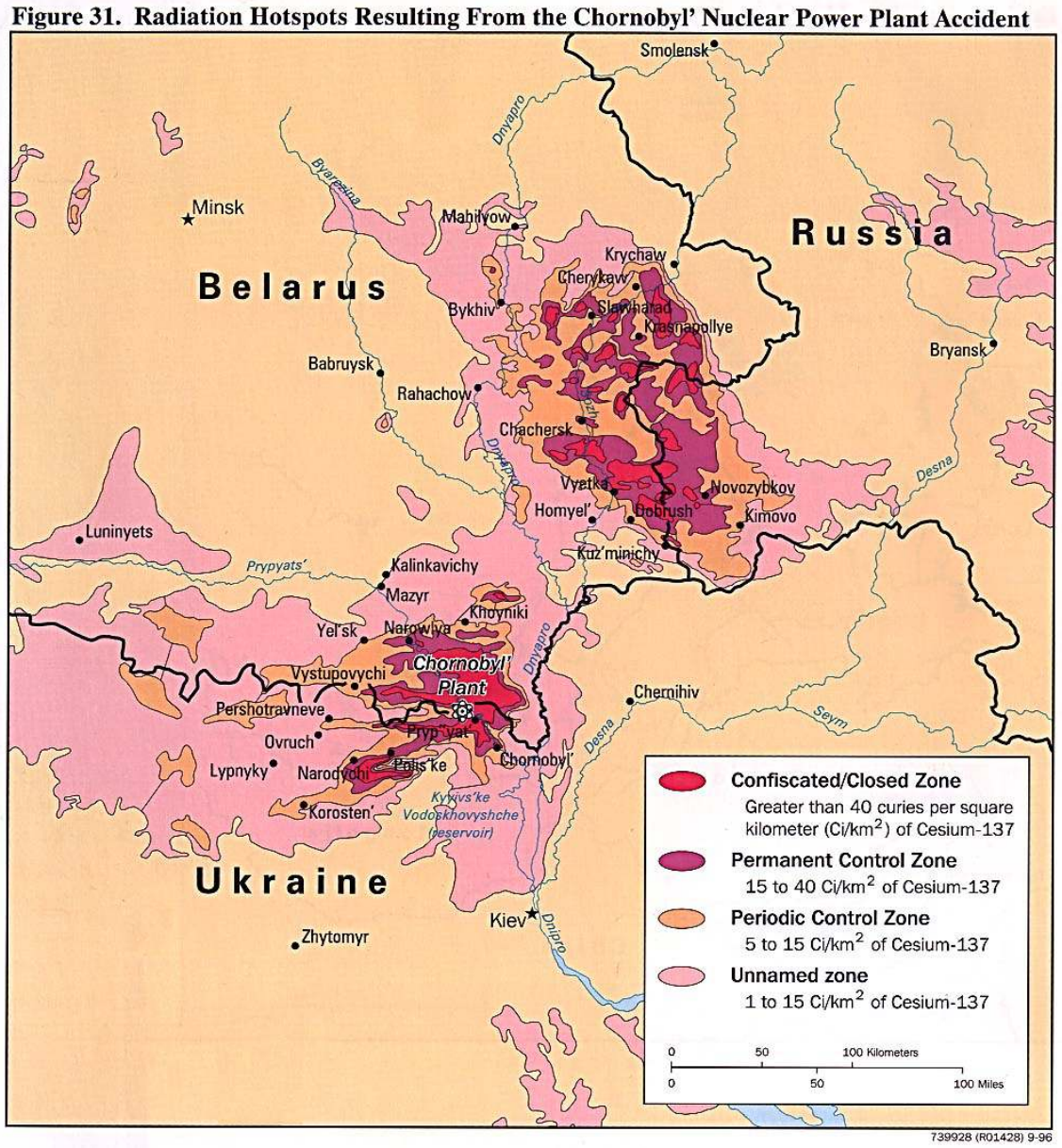
* Obsah uranu v rudách se pohybuje v řádu pouhých desetin procent (odpad při zpracování)
* Nebezpečí jaderného výbuchu
* Nebezpečný odpad

ČERNOBYLSKÁ HAVÁRIE

Nejhorší katastrofa jaderné elektrárny v historii.
26. dubna 1986 jeden z reaktorů elektrárny **na Ukrajině** explodoval. Do atmosféry se dostalo ohromné množství radioaktivity, podle vědců **víc než po výbuchu jaderných pum nad Hirošimou a Nagasaki.**
Způsobila rakovinu u tisícovek dětí☹ Třicetikilometrový okruh kolem elektrárny zůstává veřejnosti nepřístupný.
Reaktor číslo čtyři je pod ohromným betonovým krytem, který se pomalu rozpadá.
Zbytek elektrárny přestal sice fungovat v roce 2 000, stále zde ale na různých úkolech pracují téměř čtyři tisíce lidí.

Okamžité následky havárie

- 203 osob bylo okamžitě hospitalizováno
- 31 osob zemřelo, 28 z nich na přímé ozáření
- 135 000 osob bylo z oblasti evakuováno
- 50 000 osob bylo z města Pripjať
- Ukrajinské ministerstvo zdravotnictví předpokládá v následujících 70 ti letech 2% zvýšení úrovně rakoviny u obyvatel
- 10 osob umírá v důsledku havárie na rakovinu
- z cca 190 t oxidu uraničitého uniklo 13 – 30% do ovzduší (radioaktivní mrak)



Obr.č.1: Mapa radiačního spadu a zamoření oblastí kolem JE

Krátkodobé dopady

Pracovníci a likvidátoři

- **pracovníky zasahující na místě havárie zasáhly vysoké dávky radiace**
- **neměli dozimetry ani ochranné pomůcky**
- **podle odhadů se 300 až 600 tis. osob účastnilo vyčištění 30km evakuační zóny kolem reaktoru**
- **odhad na 211 000 pracovníků a likvidátorů havárie obdrželo prům. dávku 165 milisievert = 16,5 rem)**

Civilisté

- **děti byly v kontam. oblastech vystaveny vysokým dávkám až 50 Gy ze štítné žlázy, protože přijímaly radioaktivní jód z místního mléka**
- **výskyt rakoviny u dětí na Ukrajině, Bělorusku a Rusku prudce vzrostl**
- **potvrzeno 1800 případů rakoviny štítné žlázy u dětí**
- **časté vrozené vady**

Obr.č.2: **vrozené vady**

Dlouhodobé dopady

- brzy po havárii největší problém radioaktivní ^{131}I s poločasem rozpadu 8 dnů, dále pak ^{137}Cs, ^{90}Sr poločas rozpadu 30 let

Globální dopad

- dle studií IAEA (Černobylská havárie uvolnila tolik radioakt. kontaminace jako 400 bomb z Hirošimy
- její celková velikost však 100x až 1000x menší než při testech jaderných zbraní v polovině 20.st.
- havárie nepřerostla do globál. rozměrů

Dopad na přírodu

- na první konferenci v r. 1990 o biologických a radioaktivních aspektech Černobylské havárie bylo oznámeno, že úroveň spadu v 10km zóně kolem JE je až 4,81 GBq/m^2
- tzv. Rudý les z borovic zničený silným radioakt. spadem leží v této zóně (název pochází z dnů po havárii, stromy se jevily temně rudé jak hynuly na následky radiace)
- Rudý les (byl srovnán se zemí a spálen, dodnes jedno z nejzamořenějších míst na světě)
- Divoká příroda: dnes je zde jedinečná rezervace divoké přírody

- **doposud nezjištěn přímý dopad na flóru a faunu v oblasti, protože zvířata i rostliny se vzájemně významně liší a jejich radiační tolerance je jiná než lidská**
- **zdá se že se rozmanitost druhů v oblasti vlivem odchodu lidí zvýšila**
- **obl. zvaná Ryšavý les – prokázány podivně zmutované rostliny i plodiny**
- **tato oblast je tichá, ptáci doposud tuto oblast nekolonizovali**
- **rovněž myši a jiní hlodavci se nevyskytují**

Fotodokumentace oblasti

Obr.č.3: celkový pohled, měření radiace

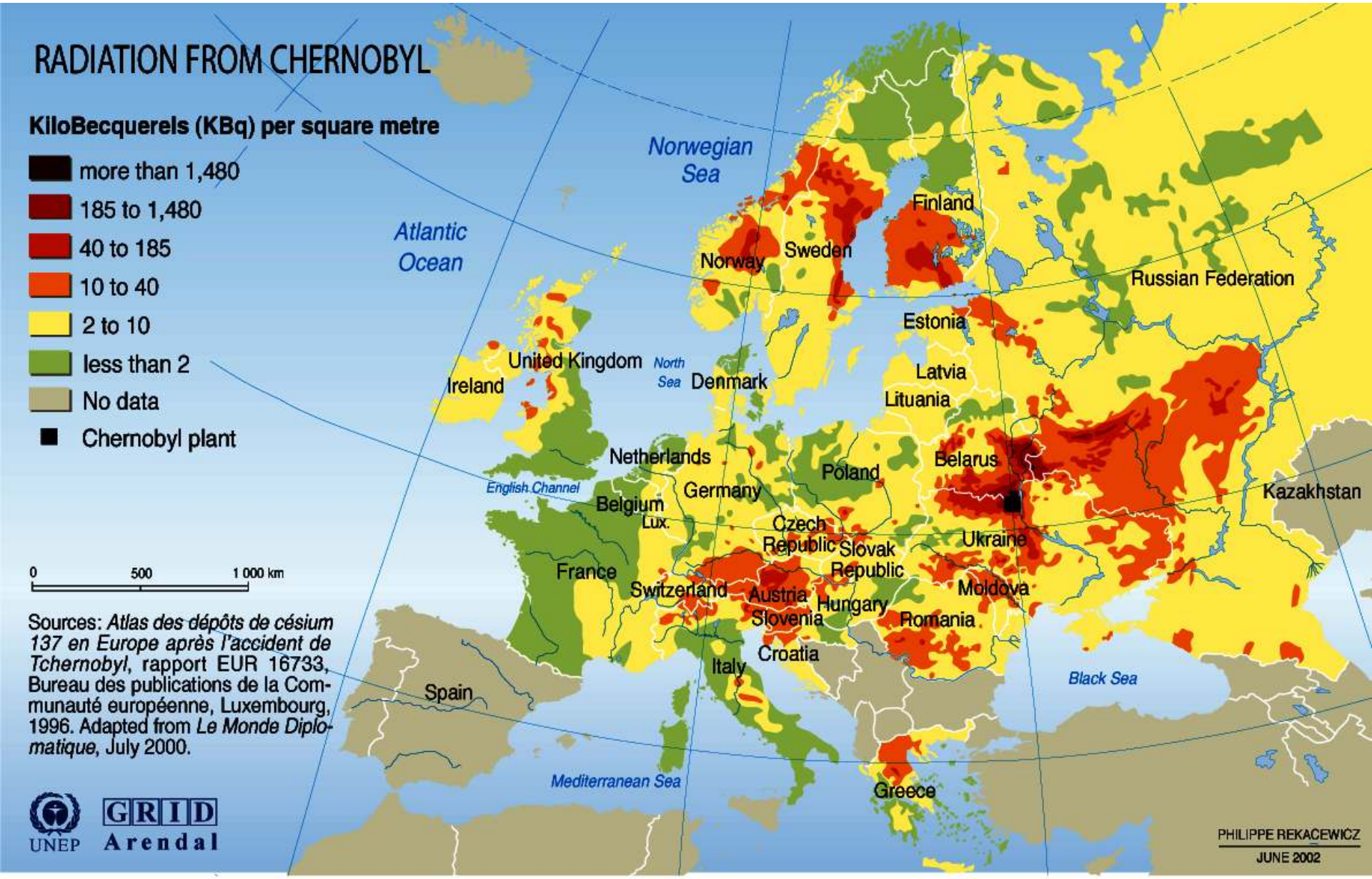
Obr.č.4: vrtulník Mi-26 během hašení

Obr.č.5: sarkofág

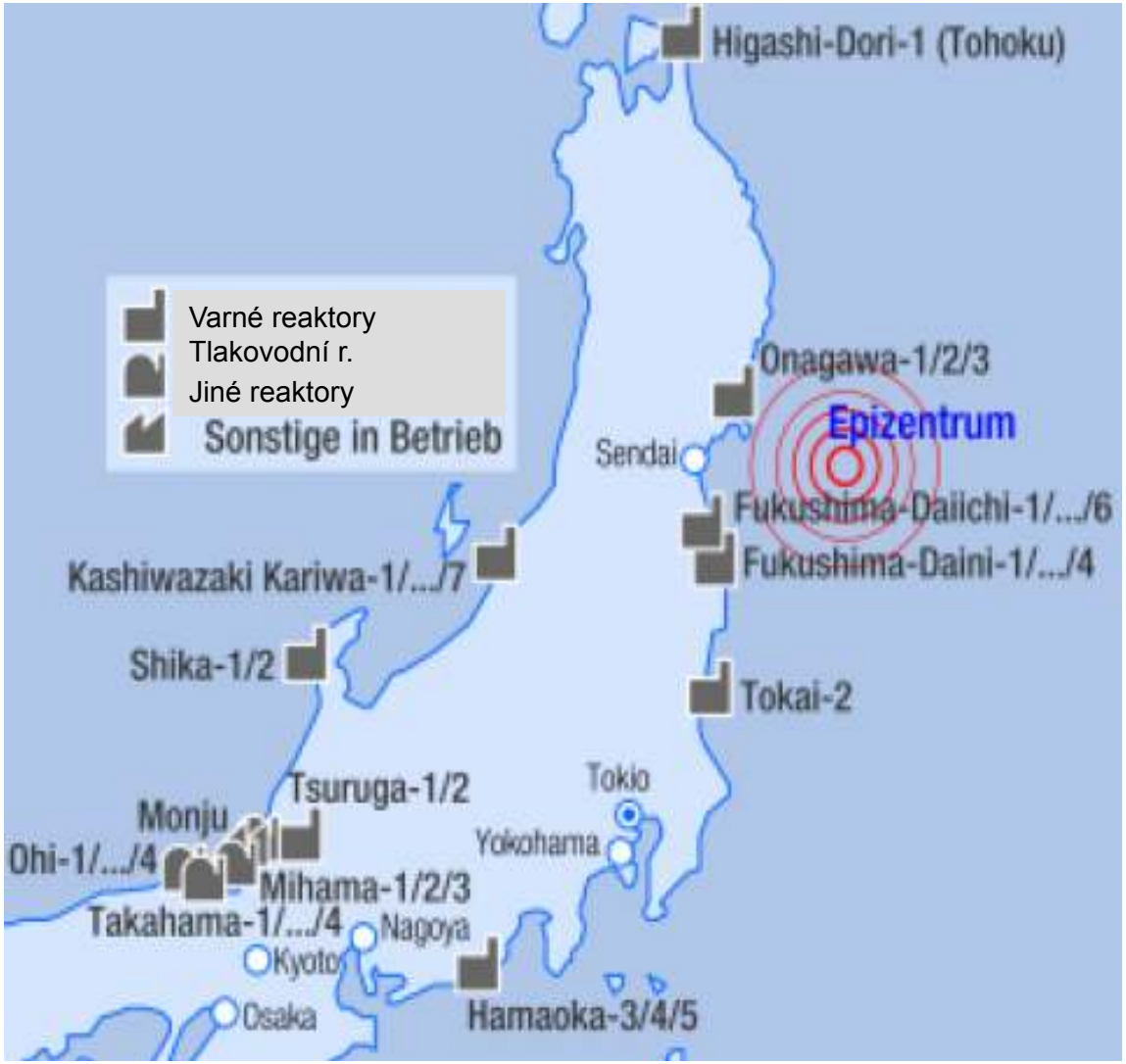
Obr.č.6: letecký snímek

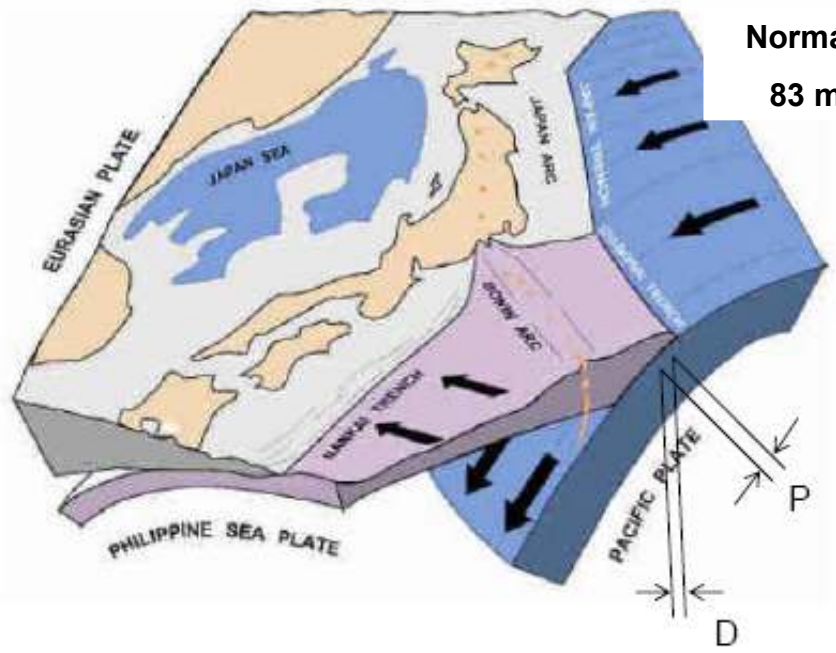
Obr.č.7: lokalita JE Černobyl

Obr.č.9: opuštěné město „duchů“ Pripjať



Sources: UNEP/GRID-Arendal, European Environment Agency; *AMAP Assessment Report : Arctic Pollution Issues,* Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 1998, Oslo; European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP); Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long range transmission of air pollutants in Europe, 1999. Adapted from *Le Monde Diplomatique, July 2000.*


Higashi-Dori-1 (Tohoku)
Varné reaktory
Tlakovodní r.
Jiné reaktory
Sonstige in Betrieb
Onagawa-1/2/3
Epizentrum
Sendai
Fukushima-Daiichi-1/.../6
Fukushima-Daini-1/.../4
Kashiwazaki Kariwa-1/.../7
Shika-1/2
Tokai-2
Tsuruga-1/2
Tokio
Monju
Yokohama
Ohi-1/.../4
Mihama-1/2/3
Takahama-1/.../4
Nagoya
Kyoto
Osaka
Hamaoka-3/4/5



Normální posun:

83 mm ročně

11. března 2011 ve 14:46 japonského času (5:46 UTC)
Hloubka hypocentra ≈ 22 až 32 km
Délka trhliny: ≈ 500 km
Přemístění D ≈ 10 m až 25 m (?)
Přemístění P ≈ 17 m
Historická klasifikace:
Největší zaznamenané v Japonsku, páté největší zaznamenané na světě
Magnitudo: MW = 9.0

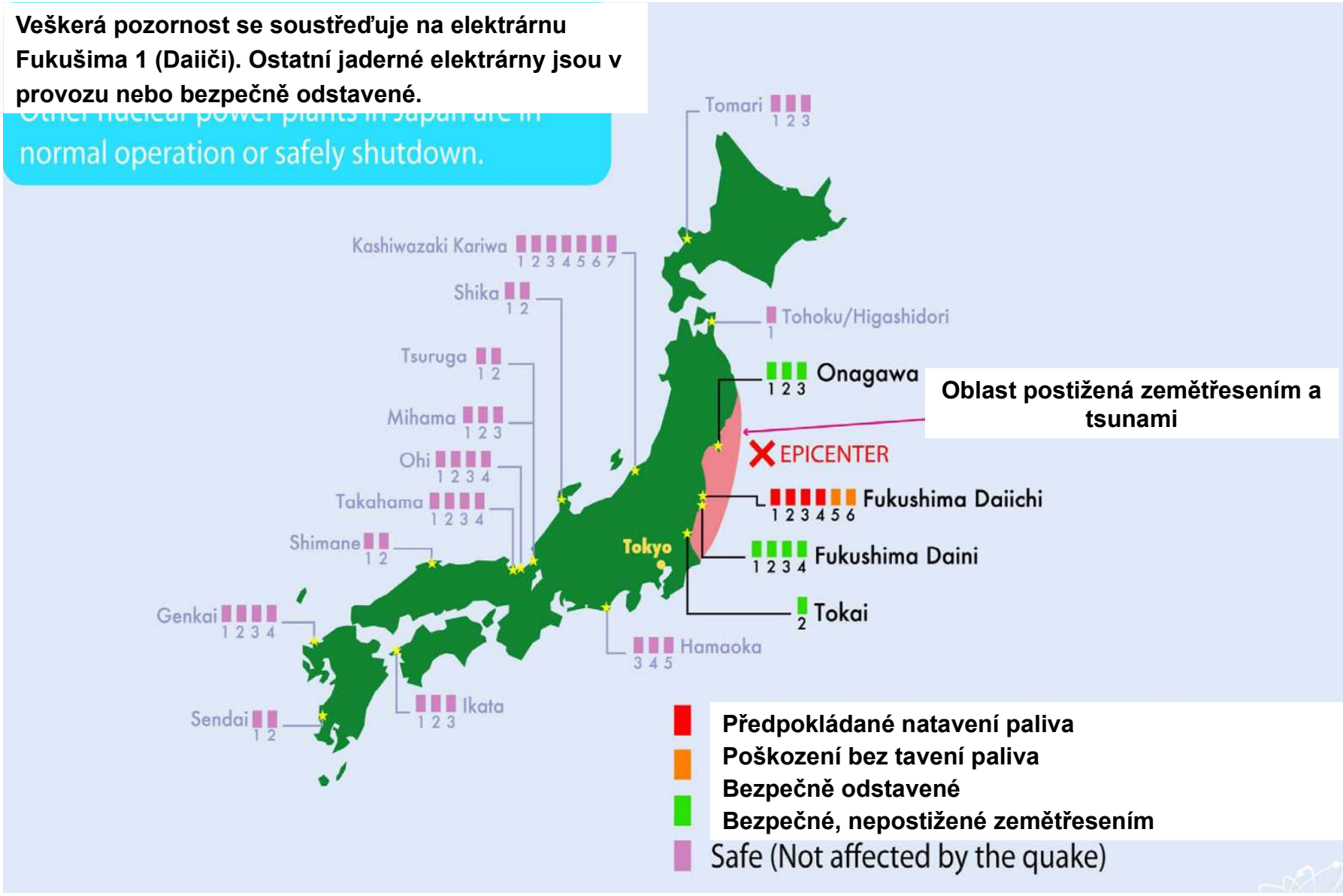
JE Fukušima byla připravená na MW = 8.2 (Design Basis), toto zemětřesení bylo tedy 8x větší! (stupnice magnitud je logaritmická)

Porovnání s největšími zemětřeseními v Evropě

místo	magnitudo
Basilej 1356	6,9
Düren 1756	5,9
Albstadt 1978	5,1
Roermond 1992	5,3

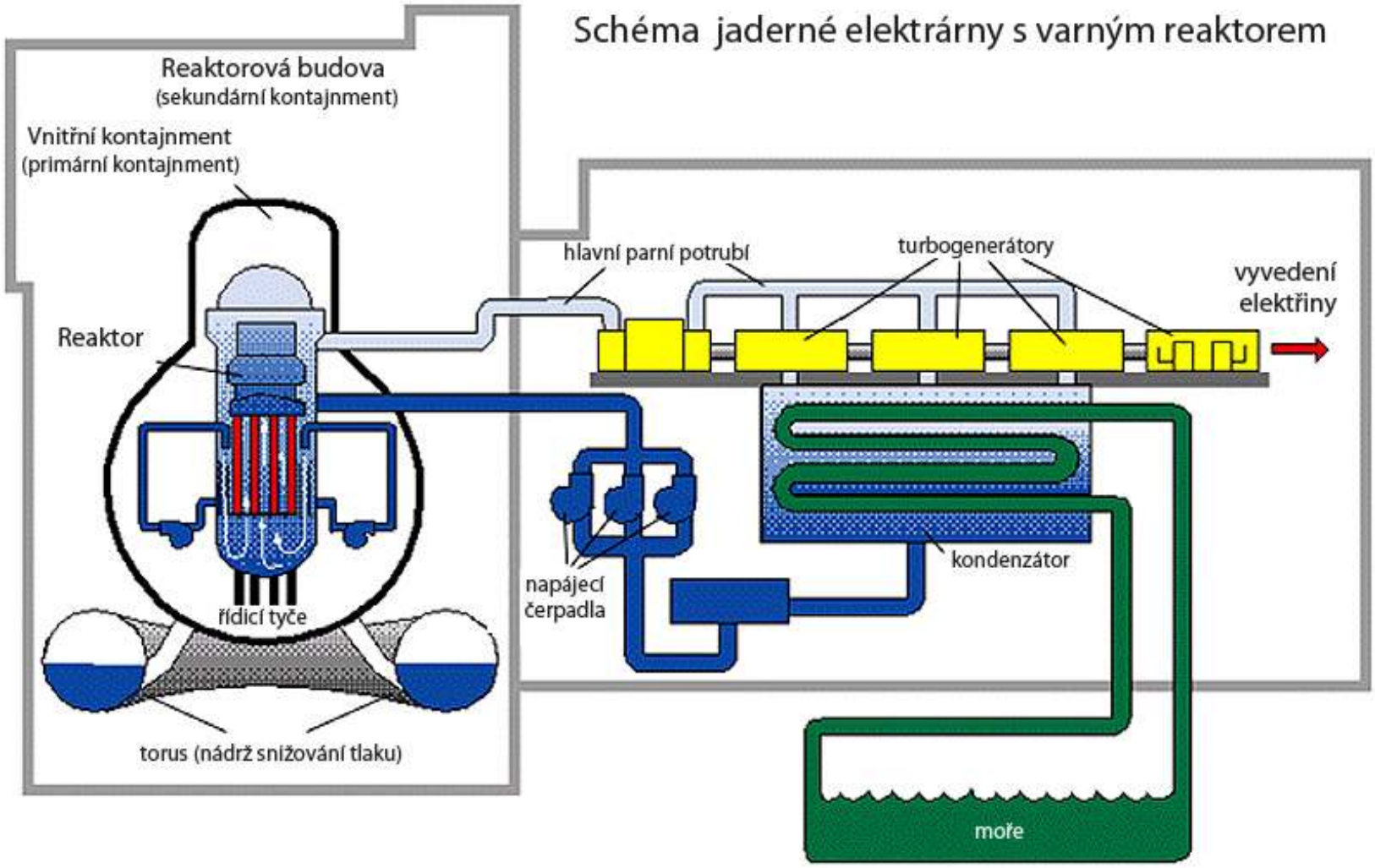
Unit 6
Unit 5
Unit 1
Unit 2
Unit 3
Unit 4

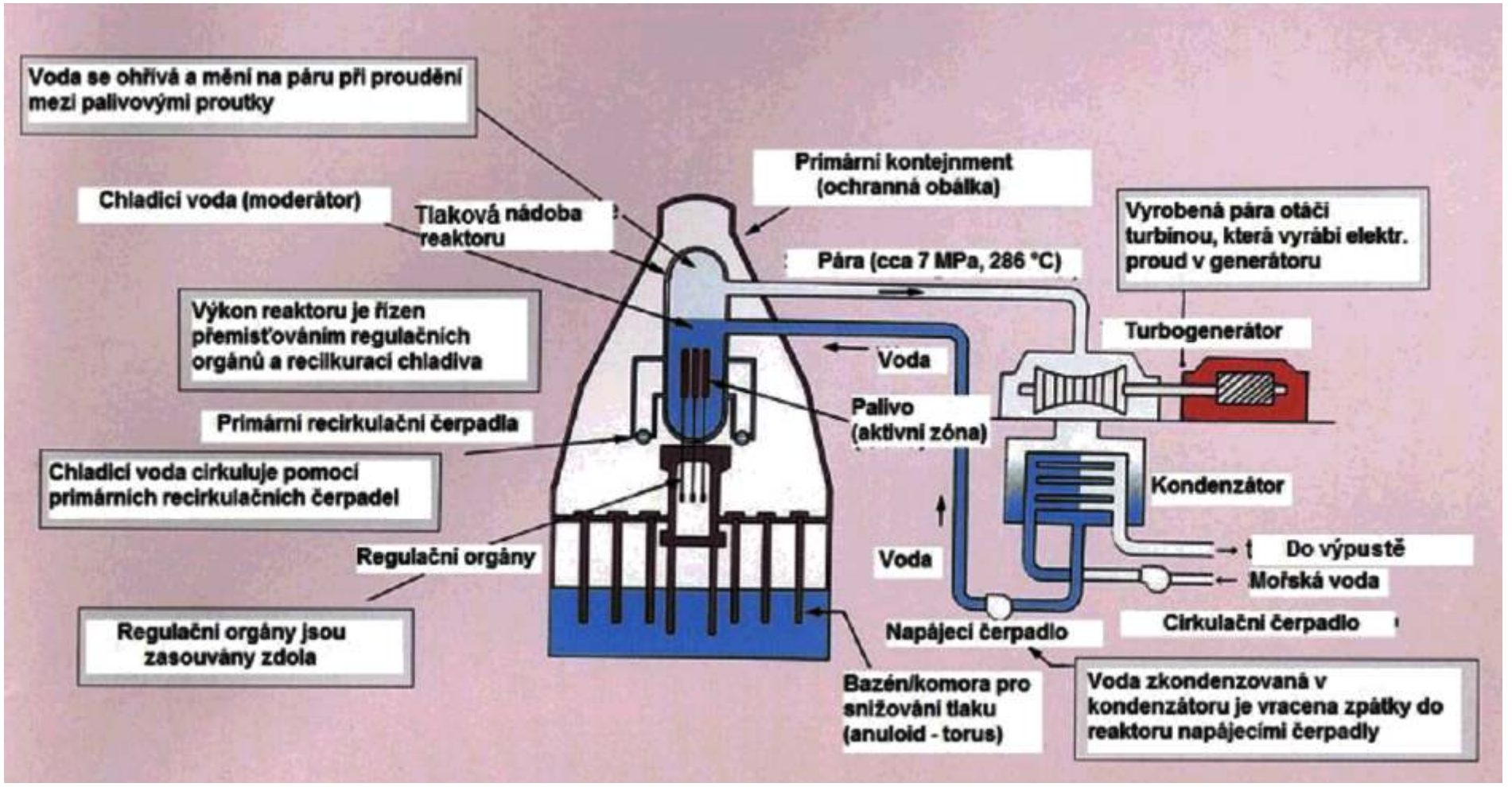
Veškerá pozornost se soustřeďuje na elektrárnu Fukušima 1 (Daiiči). Ostatní jaderné elektrárny jsou v provozu nebo bezpečně odstavené.



Množství vody: 40 km^3 (40 miliard tun)
Výška vlny (vypočítaná a změřená GPS): maximum 23 m
Doba příchodu od epicentra k pobřeží: 15 minut
Doba příchodu od epicentra k Fukušimě: 55 minut
Výška vlny ve Fukušimě(TEPCO): 14 m
Zabezpečení Fukušimy I: 5.7 m
Výška reaktoru a strojovny nad hladinou moře: 10 až 13 m
Zabezpečení JE Onagawa: 25 m

Schéma jaderné elektrárny s varným reaktorem




Voda se ohřívá a mění na páru při proudění mezi palivovými proutky
Chladicí voda (moderátor)
Tlaková nádoba reaktoru
Primární kontejnment (ochranná obálka)
Pára (cca 7 MPa, 286 °C)
Vyrobená pára otáčí turbinou, která vyrábí elektr. proud v generátoru
Turbogenerátor
Výkon reaktoru je řízen přemisťováním regulačních orgánů a recirkurací chladiva
Voda
Palivo (aktivní zóna)
Primární recirkulační čerpadla
Chladicí voda cirkuluje pomocí primárních recirkulačních čerpadel
Kondenzátor
Regulační orgány
Voda
Do výpustě
Mořská voda
Regulační orgány jsou zasouvány zdola
Napájecí čerpadlo
Cirkulační čerpadlo
Bazén/komora pro snižování tlaku (anuloid - torus)
Voda zkondenzovaná v kondenzátoru je vracena zpátky do reaktoru napájecími čerpadly

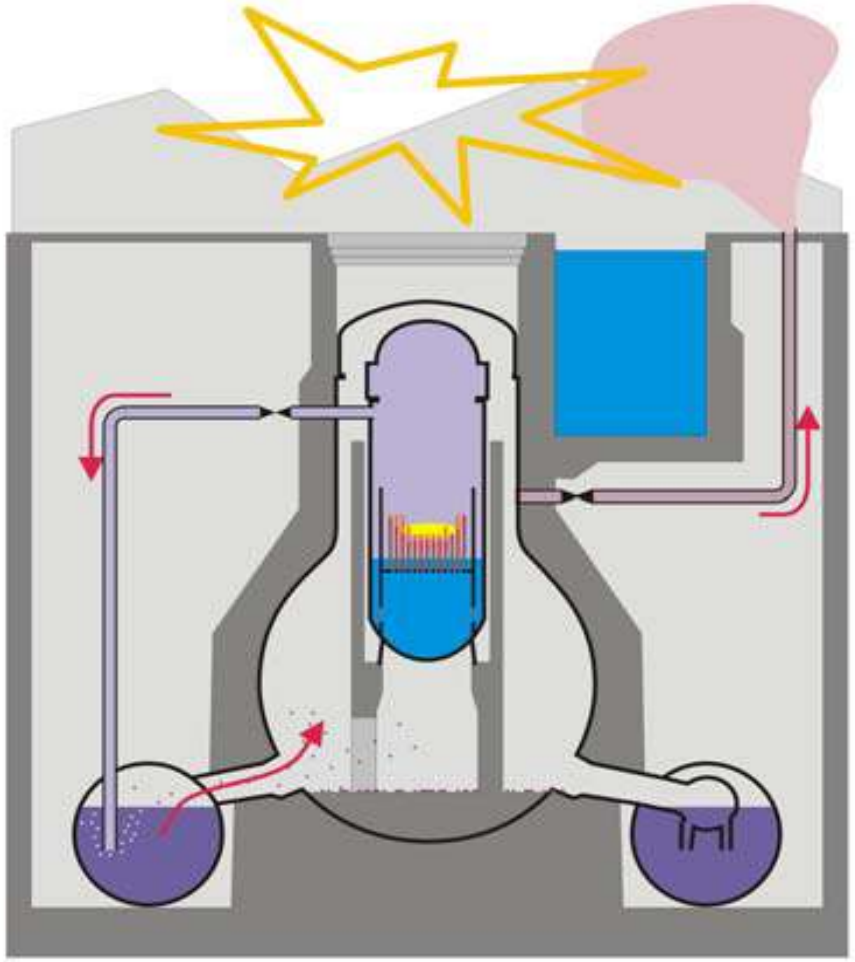
Při nedostatku chlazení se stále vařila voda v reaktoru, rostl tlak, pára se musela přepouštět do sekundárního kontajnmentu.

Povrchová teplota reaktoru přes 1200° C

Při nedoplňování vody do reaktoru došlo k částečnému obnažení palivových článků. Reakcí vodní páry s pokrytím palivových článků (slitina zirkonia) vzniká vodík

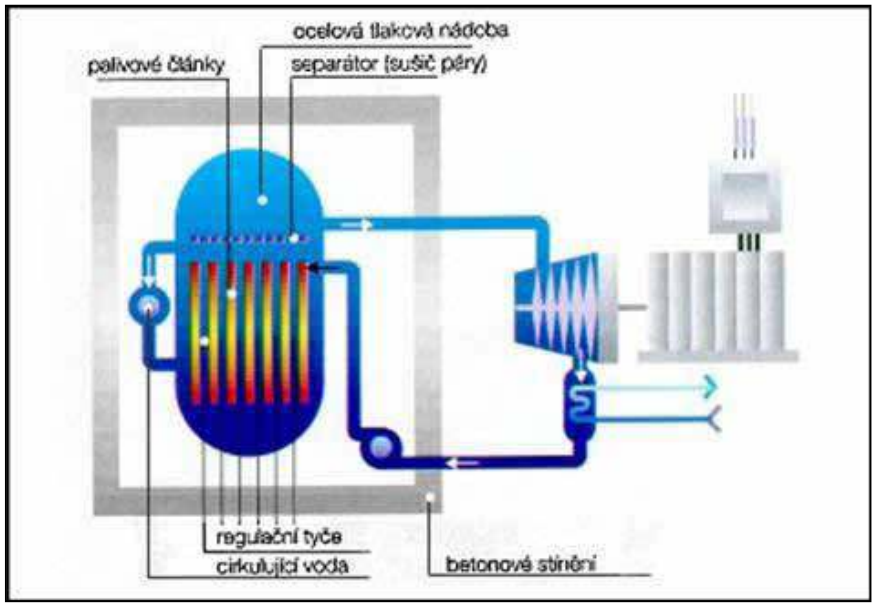
$Zr + 2H_2O > ZrO_2 + 2H_2$

Vodík nahromaděný pod střechou sekundrního kontejnmentu vybuchl.



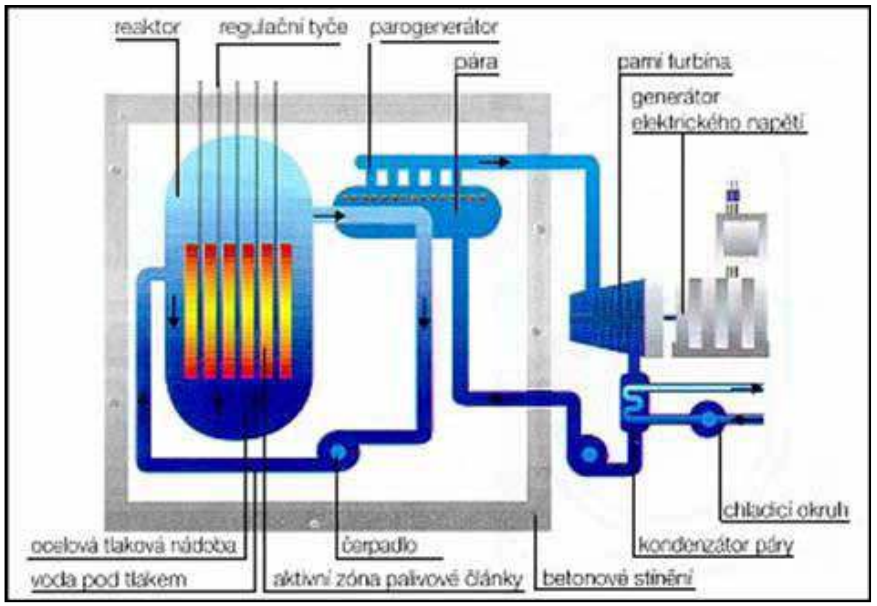
Jaderný komplex Fukušima po zemětřesení a tsunami

FUKUSHIMA – DAIICHI, DAINI



- Uvedení do provozu 1971 – 1978
- Technologie s varným reaktorem (BWR)
- Projektové zemětřesení - horizontální povrchové zrychlení 0,18 g
  - V roce 1978 přestála JE Fukushima zemětřesení 0,125 g bez poškození
  - Zemětřesení 11. 3. 2011 přesáhlo 0,4 g (stupeň 9)
- Projektové tsunami – 6,5 m vs. tsunami 11. 3. 2011 – až 10 m

TEMELÍN, DUKOVANY



- Uvedení do provozu (EDU 1985 – 1987, ETE 2000 -2002)
- Technologie s tlakovodním reaktorem (VVER, PWR)
- v seismicky klidných zónách, postaveny tak aby odolaly zemětřesení 5,5 stupně, t. j. 10krát silnějšímu, než bylo nejsilnější zemětřesení zaznamenané v ČR (4,6 stupně).
- na kopcích nehrozí povodně (2002 přestála ETE bez problémů)

Postupná změna názoru na jádro

- V poslední době
  - veřejnost více rozlišuje mezi Černobylem a elektrárnami provozovanými v EU (projekt, dozor, kultura)
  - jaderné elektrárny mají výborné statistiky bezpečnosti
  - roste ekonomická výhodnost stávajících elektráren
  - změny podnebí jsou zřetelnější
  - ceny ropy lámou rekordy
  - dynamická výstavba jaderných elektráren v Asii pokračuje
  - bezpečnost dodávek elektřiny je velké téma
- politici opět začínají brát jádro na milost

Jaderná energetika neposkytuje ideální a pohodlné řešení, ale může k řešení přispět a získat nám tím ČAS

Generace IV - nová generace jaderných energetických systémů

- Vývoj se zaměřuje na dosažení následujících cílů:
  - Efektivnější využití paliva (zejména zajištění alespoň jednoho typu množivého reaktoru umožňujícího využití 238U a 232Th
  - Snížení množství jaderního odpadu (mimo jiné vyřešení transmutací aktinidů ve vyhořelém palivu)
  - Další zlepšení bezpečnosti a spolehlivosti
  - Další snížení míry pravděpodobnosti poškození aktivní zóny
  - Odstranění potřeby evakuace okolí v případě havárie
  - Nižší cena výroby el. energie v porovnání s jinými zdroji (podstatné snížení zejména investičních nákladů)
  - Úroveň finančního rizika porovnatelná s jinými energetickými projekty
  - Zvýšení resistence proti zneužití jaderných materiálů
- Projekt Generace IV je zásadně nový především v tom, že komplexně přistupuje nejen k vývoji nových reaktorů, ale snaží se řešit palivový cyklus jaderných elektráren jako celek. Není třeba zdůrazňovat, že cíle jsou velmi ambiciózní, otázkou zůstává, jak se je podaří naplnit.

Klademe si tedy správné otázky?

Otázka nezní:

„Líbí se nám jaderná energetika?“

Spíše bychom se měli ptát:

„Máme za jádro v následujících nejméně 30-ti letech rozumnou náhradu?“

„Jaká je cena dalšího využívání jádra, jaká je cena jeho odmítnutí?“

„Jaké si máme stanovit požadavky pro další využívání jádra v případě, že cena za odmítnutí je příliš vysoká?“