

# Environmentální aspekty jaderné energetiky a jaderné havárie

Václav Dostál

Přednáška v předmětu: Uran v mezinárodních vztazích

Masarykova univerzita

8. 11. 2022

# Obsah

- **Jak funguje jaderná elektrárna a její využití**
  - Jak funguje jaderná elektrárna, vysvětlení jednotlivých okruhů jaderné elektrárny, elektrizační síť a profil využití jaderné elektrárny.
- **Environmentální aspekty jaderné energetiky**
  - Environmentální aspekty jaderné energetiky, externality výroby elektřiny v jaderných elektrárnách, srovnání s dalšími elektrickými výrobkami
- **Jaderné havárie ve světě a v ČSSR**
  - Jaderná bezpečnost
  - Jaderné havárie v historii – příčiny, následky, poučení

# Proč jaderná energetika ?

- 1 chemická vazba v uhlí – několik eV
- 1 štěpení uranu – 200 MeV
- Štěpení uranu je 100 000 000 x výkonnější než pálení uhlí
- Důležitý je i objem
  - uran má přibližně 15 x vyšší hustotu než uhlí
- Podíl uranu ve vytěžené rudě
  - Několik procent
- Ztráta při obohacování



# Experimental Breeder Reactor

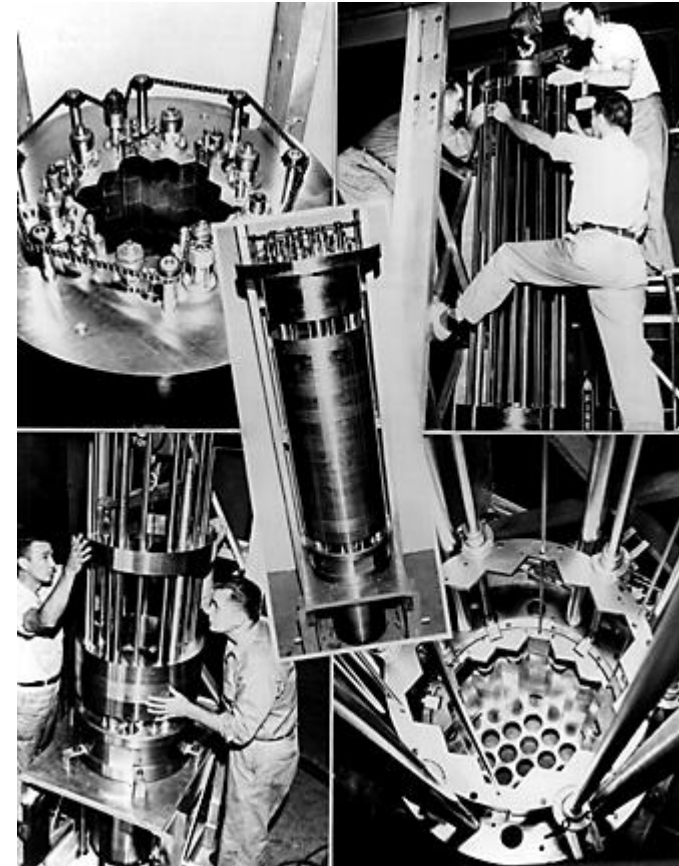
1. kritický stav 24. srpna 1951.  
20. prosince poprvé vyrobena  
elektrina z jaderné energie.

Příští den využita pro osvětlení  
celé budovy.

Výkon 200kWe

1.4MWth

Účinnost – 14%



# Jaderná elektrárna Obninsk

- AM-1 (Atom mirnyj)
- 5 MWe
- 30 MWth
- Účinnost 16,6%
- Předchůdce reaktorů typu RBMK
- Připojena k síti 26. června 1954



# Jaderná elektrárna Calder Hall

První blok připojen do sítě 27. srpna 1956

„První elektrárna,  
která dodávala do sítě  
komerční množství  
elektriny.“

4 x 50 MWe



# Oklo – Gabun

Příroda to uměla dávno před námi

Před 1 miliardou a 700 miliony lety v gabunské lokalitě Oklo fungoval jaderný reaktor.



# Oklo - Gabun

Řetězová štěpná reakce zde probíhala přibližně 500 tisíc let.

Starohorní reaktor spotřeboval podle odhadu 12 tisíc tun uranu.

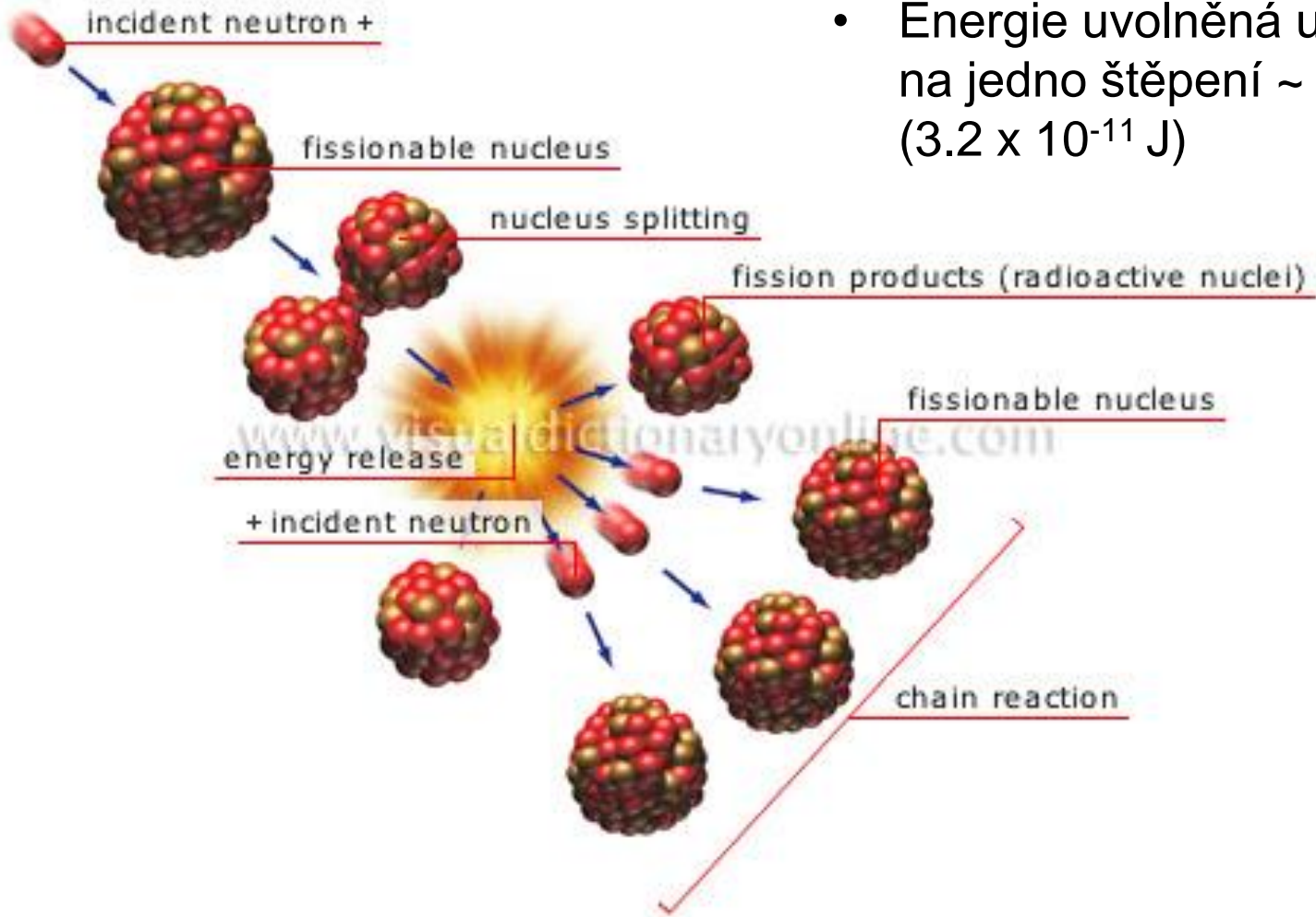
Vyrobil energii odpovídající 3 letům plného výkonu všech čtyř bloků jaderné elektrárny Dukovany.

Později v lokalitě objeveno dalších 16 „reaktorů“.

Odpověď na problematiku nakládání s jadernými odpady



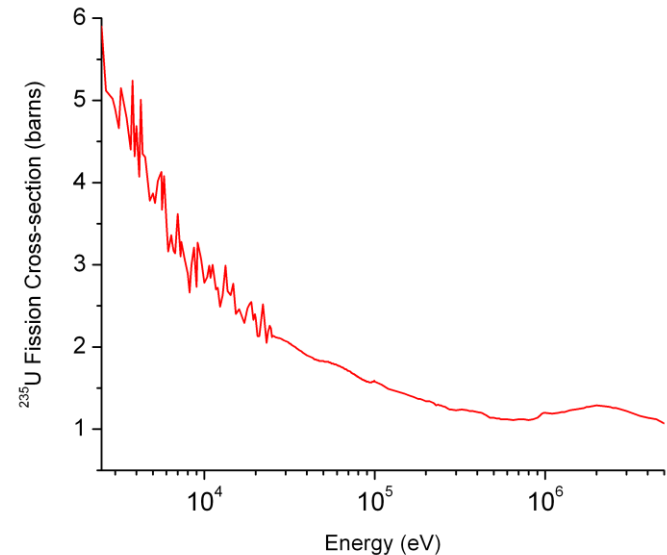
# Štěpení



- Energie uvolněná uvolněná na jedno štěpení ~ 200 MeV ( $3.2 \times 10^{-11}$  J)

# Tepelné vs. rychlé reaktory

- Na nízkých energiích je velká pravděpodobnost štěpení u U235, kterého je v přírodě asi 0,7%.
- Proto je třeba neutrony v reaktoru zpomalovat a přitom nepohlcovat, k tomu se užívá moderátor – látka s velkým obsahem lehkých prvků, např. voda.
- U rychlých reaktorů se podstatně rozšiřuje palivová základna, lze využít i U238, kterého je v přírodě 99,3% (absorpcí neutronu se změní na Pu239) – u rychlých reaktorů je třeba vyšší obohacení a nesmí se používat voda.
- Dalším materiálem, ze kterého lze vyrobit štěpný materiál je např. thorium, které produkuje U233



# Henri Becquerel

1852 – 1908

stín kovového maltézského kříže umístěného mezi deskou a uranovou solí



1896 – objev přirozené radioaktivity

# Marie Curie-Sklodowska

- 1867 – 1934
- Popis přirozené radioaktivity
- 2 Nobelovy ceny
- Na doporučení manžela pracovala jako doktorandka pod vedením Henri Becquerela
- Objev přirozené radioaktivity
- Izolování polonia a radia ze smolince z Jáchymovských dolů



# Ernst Rutherford

1871 – 1937

Definoval poločas rozpadu a záření

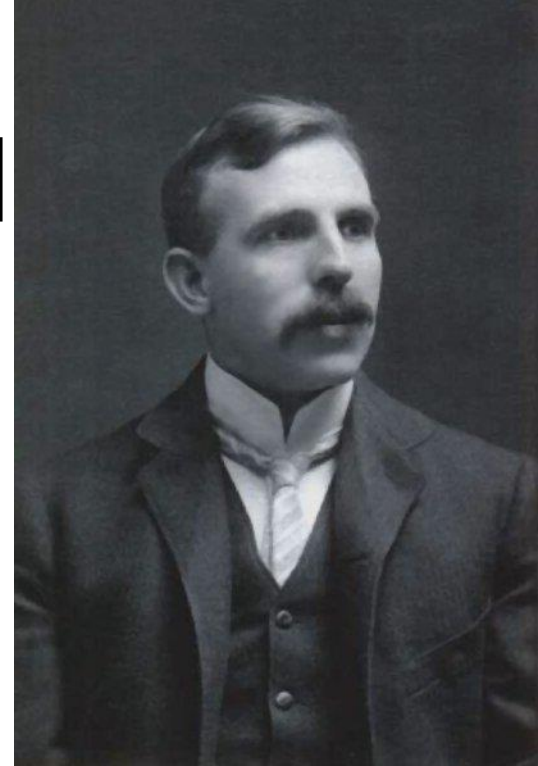
$\alpha$ ,  $\beta$  (1899),  $\gamma$  (1903)

Objev jádra atomu (1909)

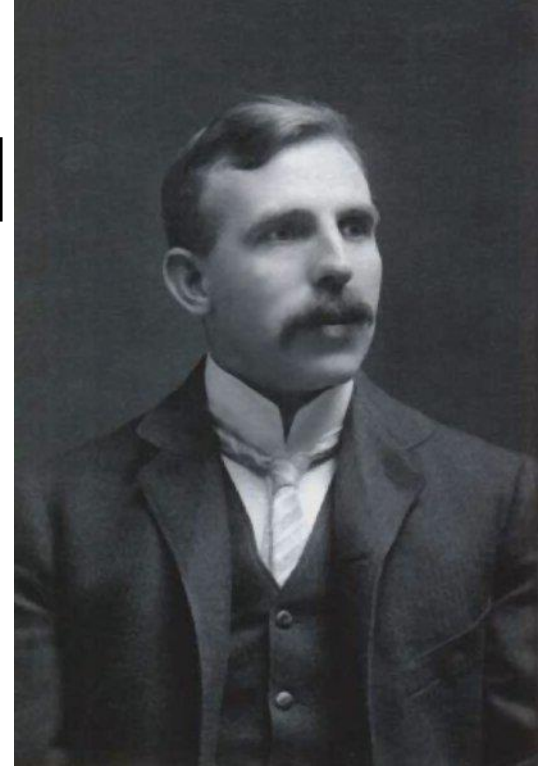
Objev protonu (1918)

Předpověděl existenci neutronu (1921)

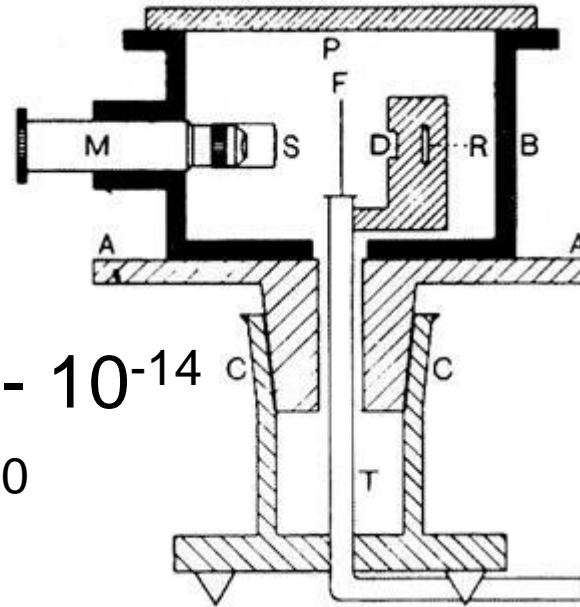
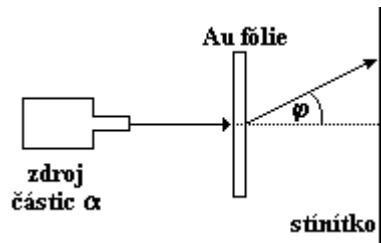
Experimentálně potvrzeno Jamesem Chadwickem  
(1932)



# Ernst Rutherford



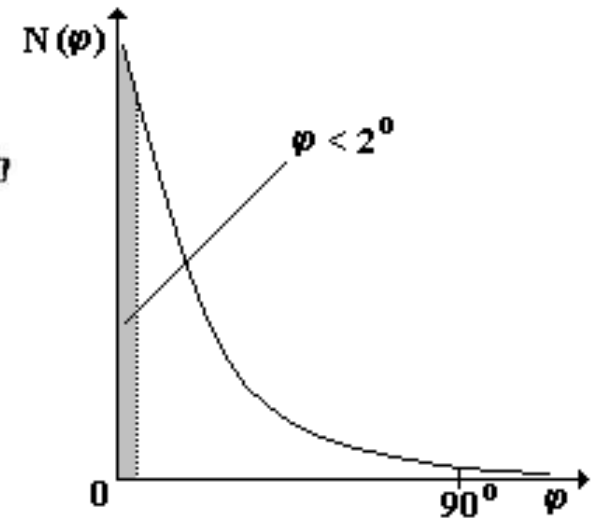
## Vyvrácení Thomsonova modelu atomu



Rozměr jádra  $10^{-15} - 10^{-14}$

Rozměr atomu  $10^{-10}$

Atom je v podstatě prázdný prostor



# Niels Bohr

Dopracoval Rutherfordův model atomu.  
Založil kvantovou mechaniku  
ve spolupráci s Heisenbergem  
a Schrödingerem.

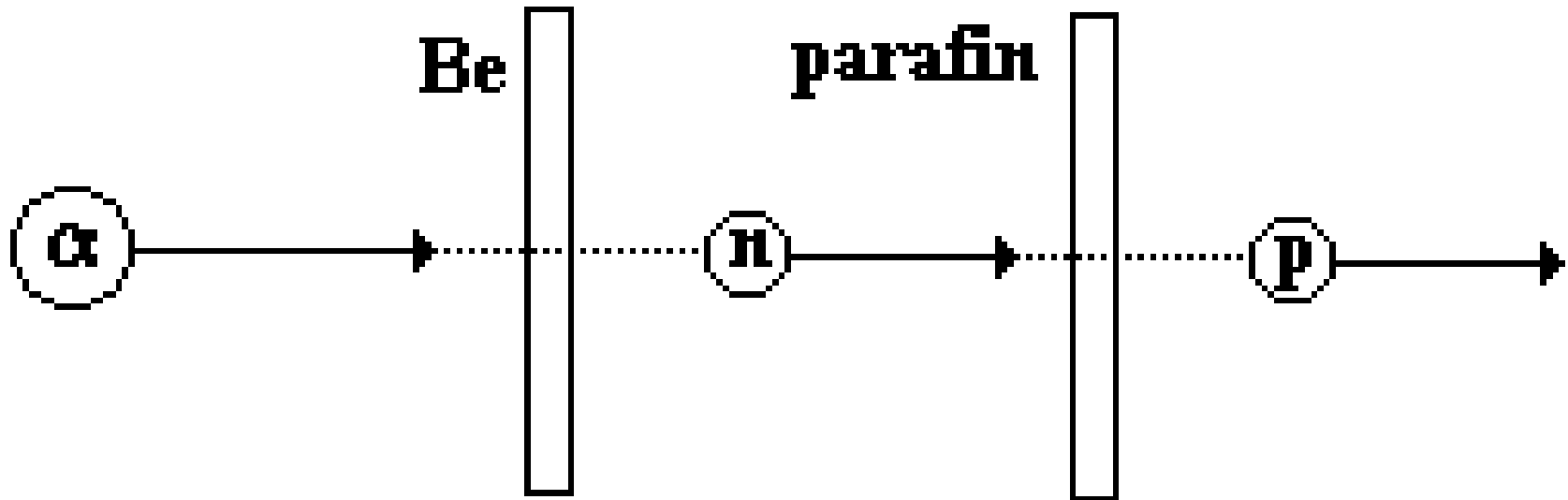


# James Chadwick

- 1891 – 1974
- Objev neutronu – 1932
- Pomocí  $\alpha$  částic ozařoval berylium a zjistil, že:
  - při následné reakci vzniká záření
  - toto záření se neodchyluje od původního směru ani v elektrickém poli ani v magnetickém poli.
  - velice snadno reaguje s parafinem (uhlovodík nasycený vodíkem).
  - z parafinu poté vylétávají protony s energií, kterou před vytržením protonu z parafinu nesla částice o zhruba stejné hmotnosti.
- Tak byl objeven neutron
- Neutronové zdroje – start reaktoru



# James Chadwick



# Objev štěpení

- Fermiho – 1934 – bombardoval uran neutrony a objevil transurany
- Německá chemička Ida Noddack v časopise *Angewandte Chemie*, No. 47, 1934, spekulovala: „Je možné, že pokud jsou těžká jádra bombardována neutrony, mohou se tato jádra rozpadnout do pár větších kousků, které jsou určitě izotopy známého prvku, ale ne příbuzného radioaktivního prvku“
- Myšlenka, že těžká jádra se mohou štěpit na menší elementy, byla považována za naprosto nepřipustnou teorii, kterou není možné prokázat experimentálně.

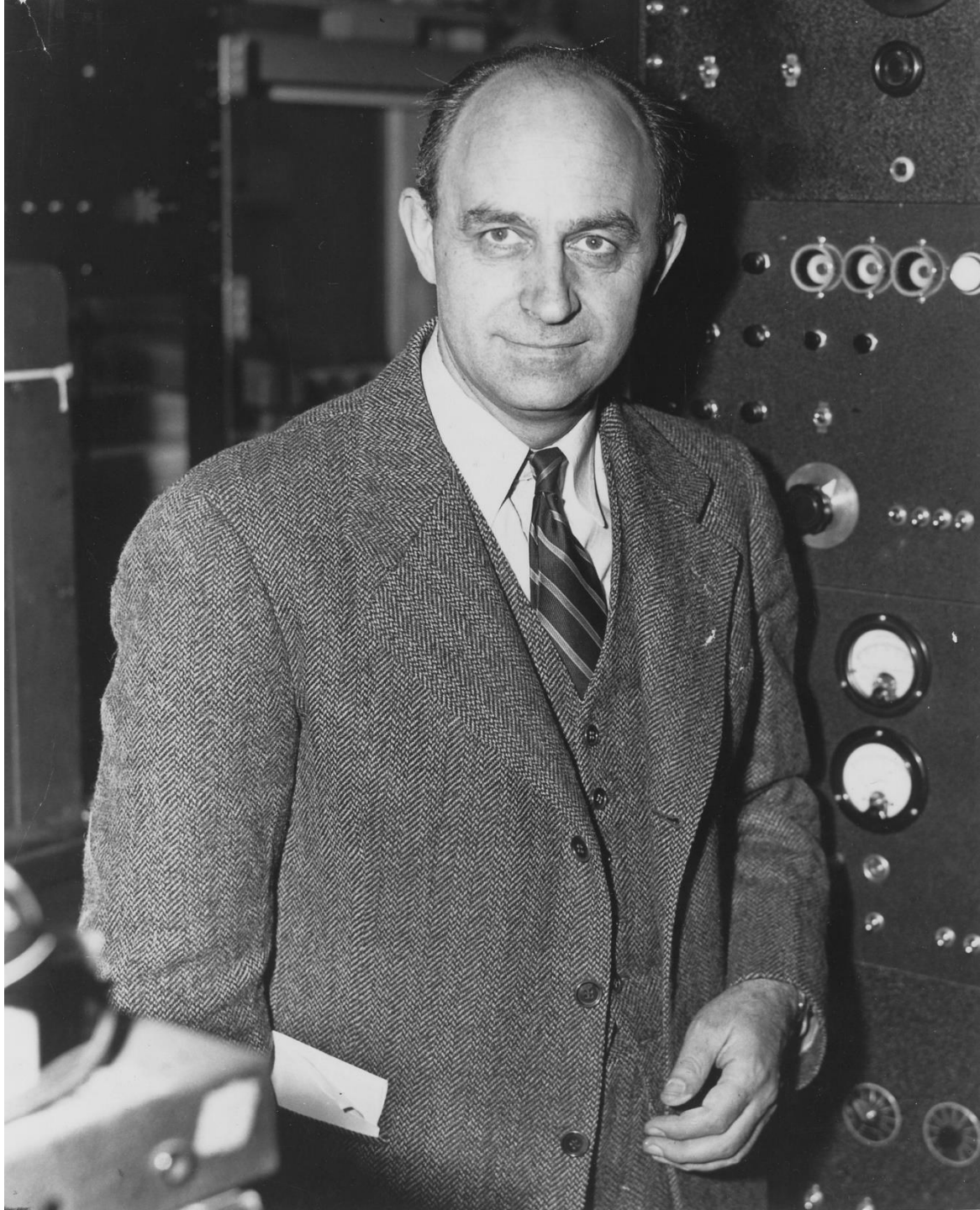
# Objev štěpení – Otto Hahn a Lisa Meitner

- V listopadu 1938 Lisa Meitnerová, dlouholetá Hahnova spolupracovnice emigrovala před nacisty z Rakouska do Stockholmu.
- Téhož roku se tajně setkala v Kodani s Hahnem; naplánovali sérii dalších experimentů, které pak prokázaly jev radioaktivního štěpení.
- V prosinci 1938 Hahn a Strassmann identifikovali barium jako prvek vzniklý bombardováním vzorků uranu neutrony, což se později potvrdilo.
- Otto Rober Frisch, synovec Meitnerové, vytvořil termín „jaderné štěpení“.
- Uznání za objev jaderného štěpení připadlo trochu nezaslouženě Hahnovi

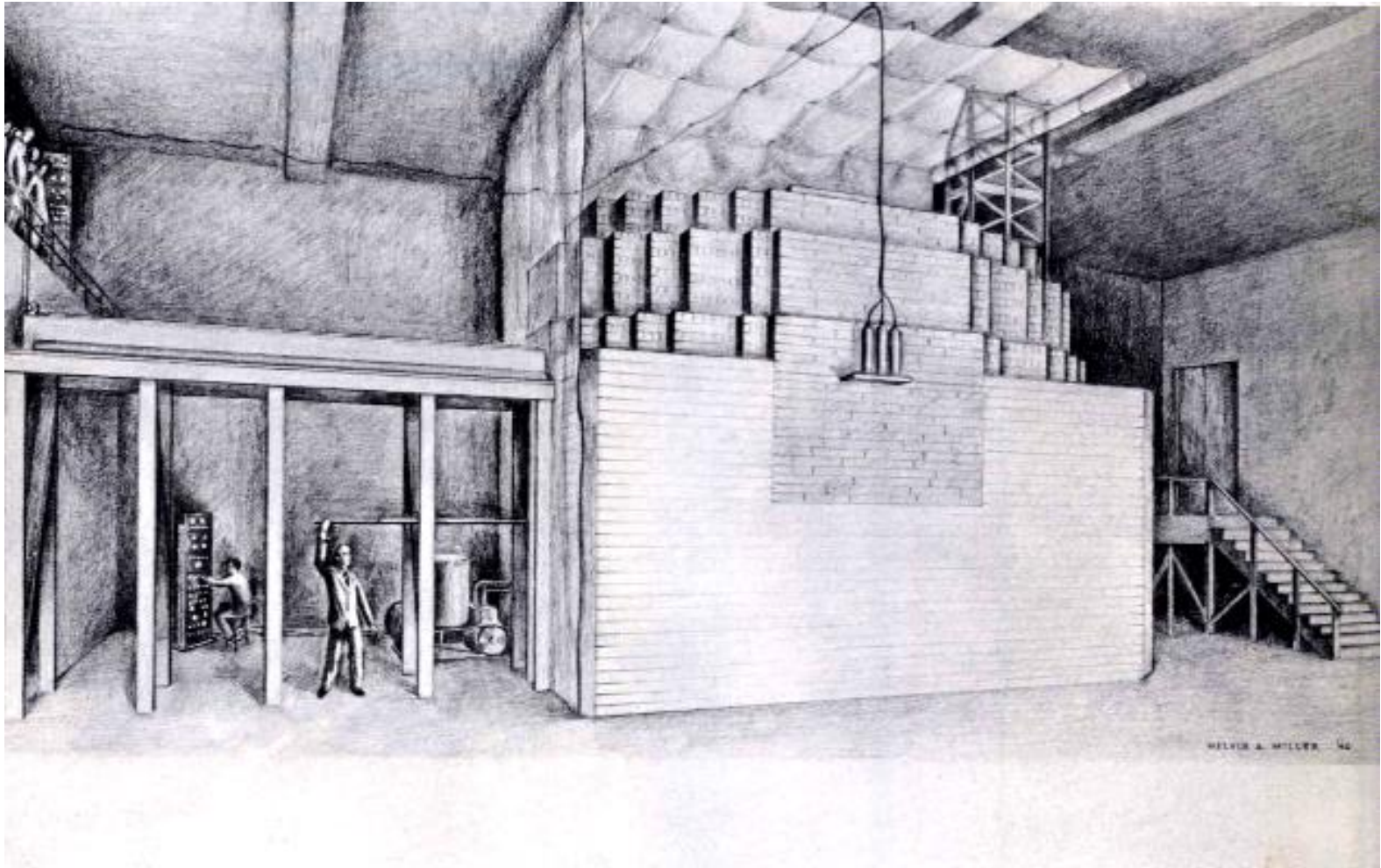


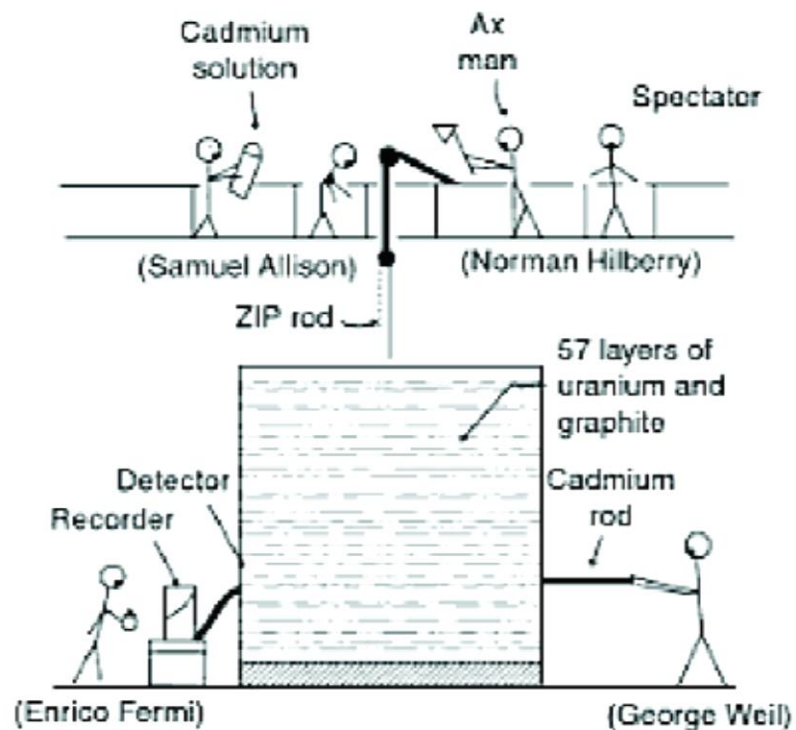
# Enrico Fermi

1901 – 1954



# 1. jaderný reaktor Chicago – 2. 12. 1942





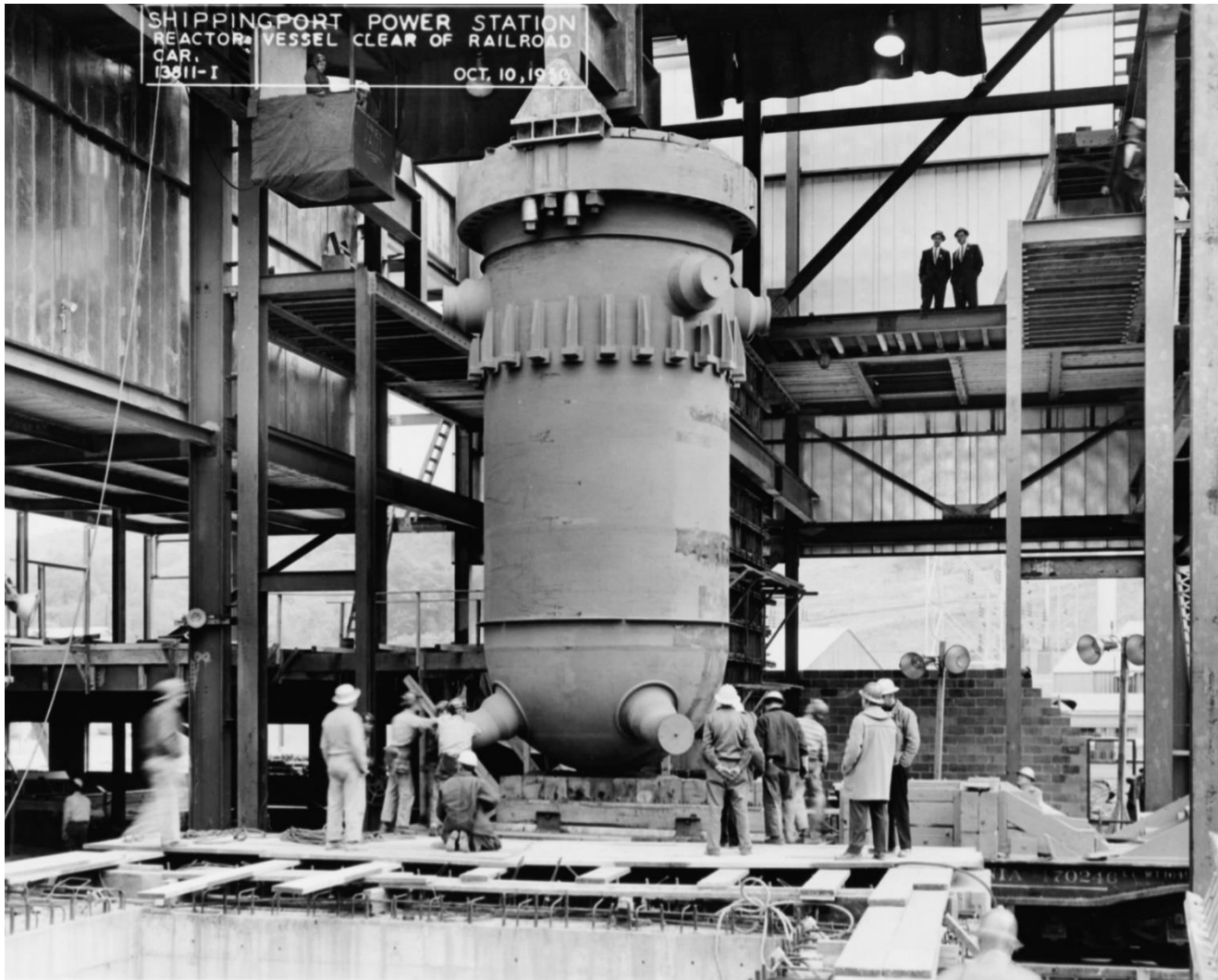
**THE FIRST REACTOR**

2, December 1942



**SCRAM = Safety Control Rod Axe Man**

# Shippingport reaktor

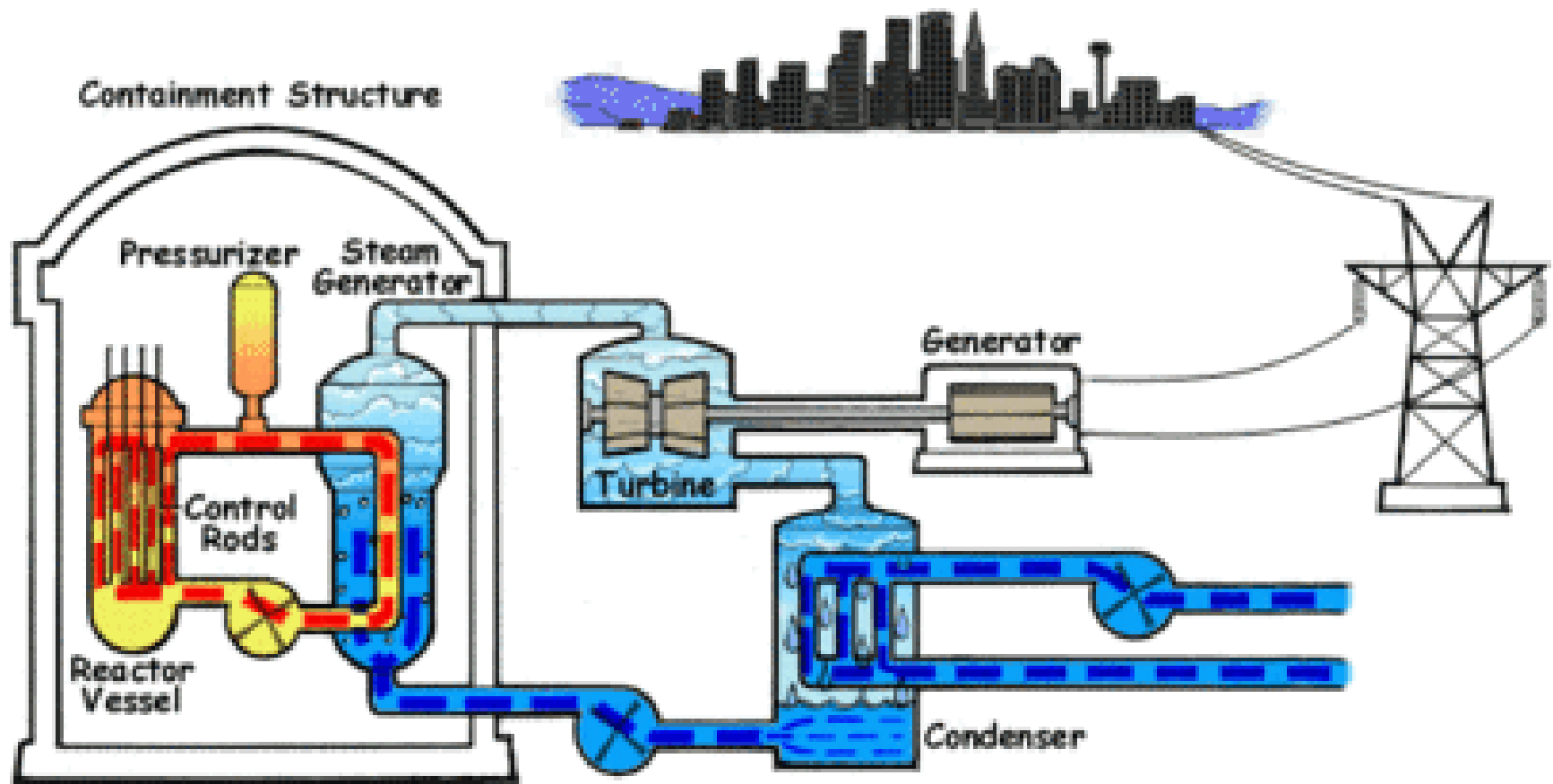


# Jaderná elektrárna Shippingport

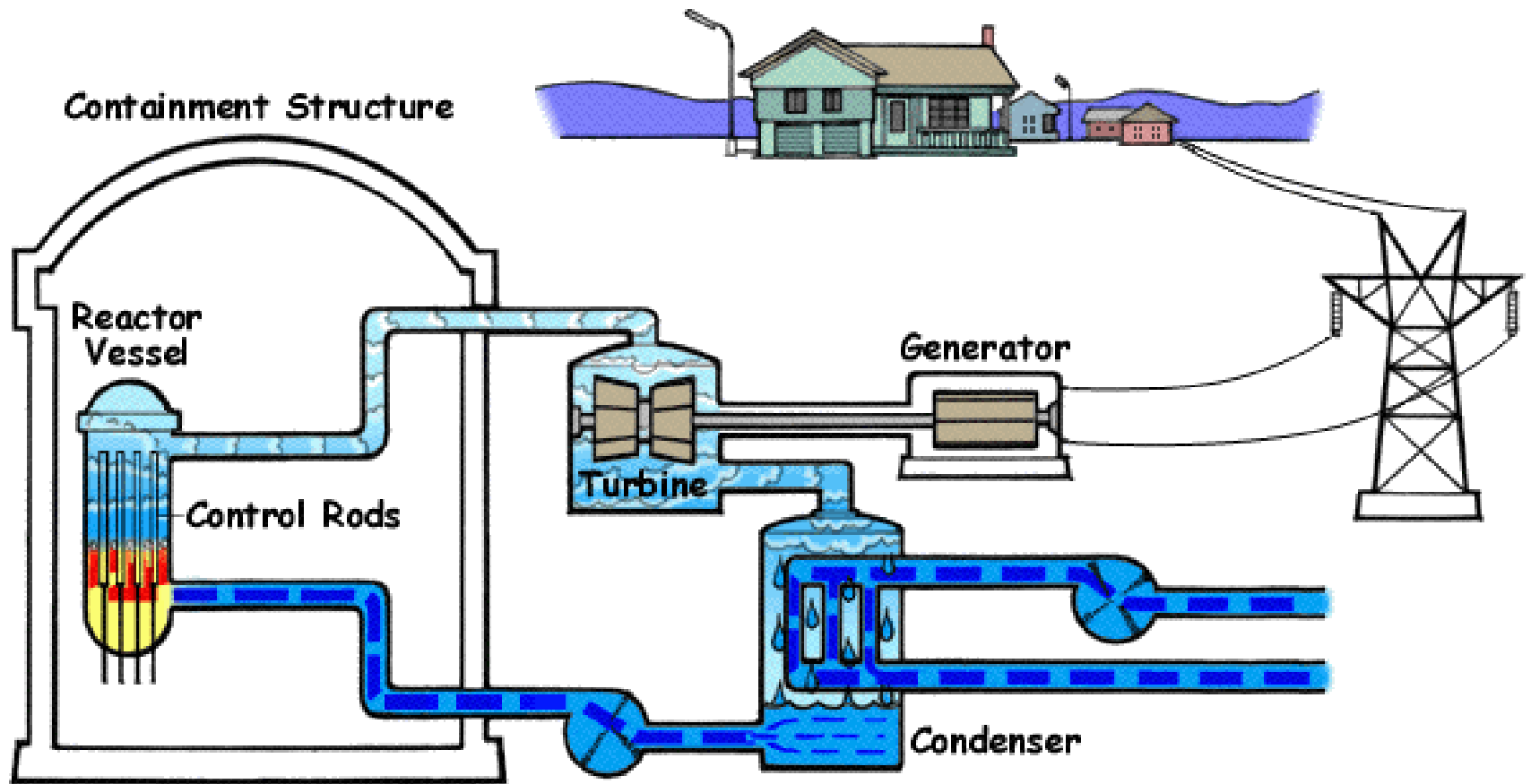
- „První velká jaderná elektrárna vybudovaná pouze pro mírové účely“
- Calder Hall vyráběla Pu pro vojenské účely
- Připojena 2. prosince 1957 a byla provozována do října 1982.
- Experimentální, lehkovodní, rychlý, množivý reaktor
- Byl schopen transmutovat thorium 232 na uran 233
- Shippingport byl vytvořen a provozován pod vedením admirála Hyman G. Rickover
- Výkon 60 Mwe
- Dva cíle
  - Pohon letadlových lodí
  - Prototyp pro komerční jaderné elektrárny



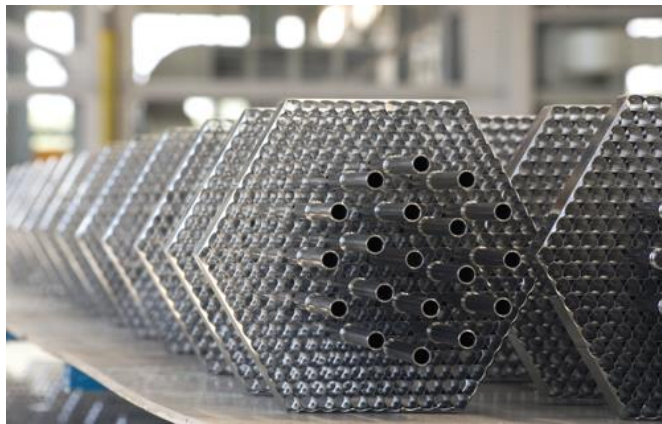
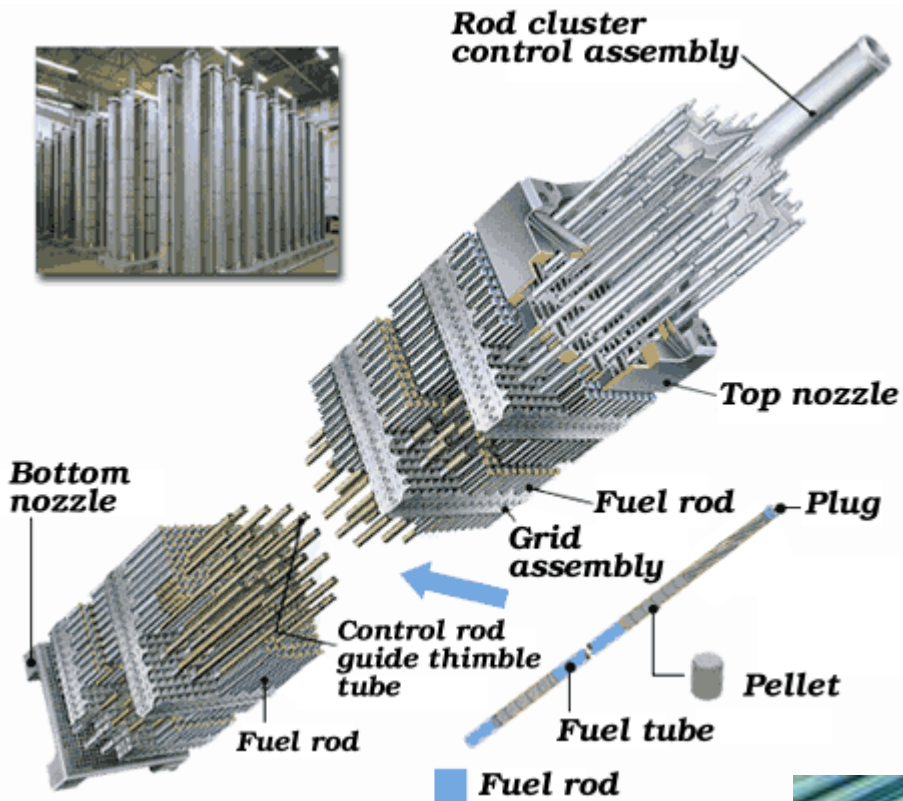
# Schéma tlakovodního reaktoru



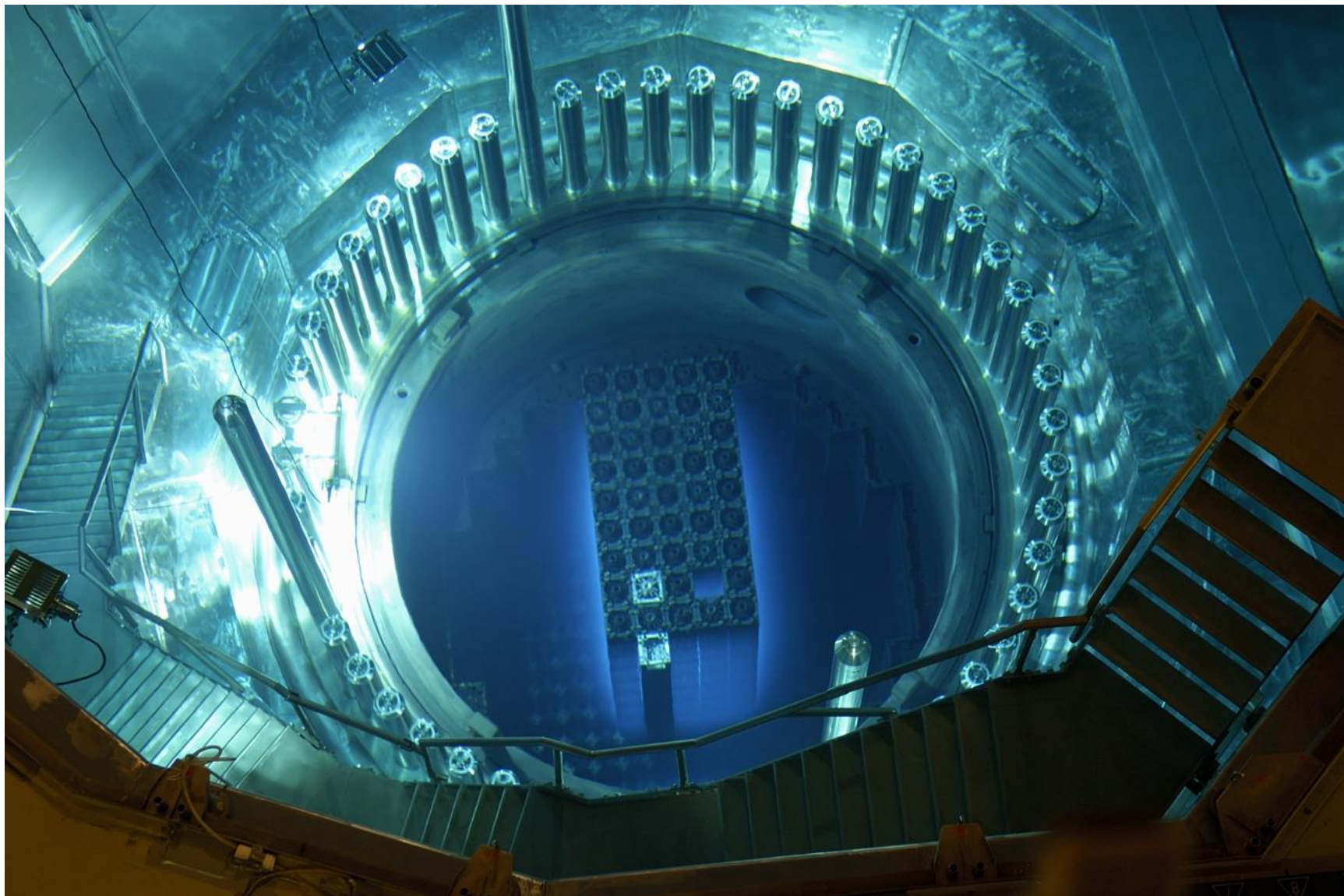
# Schéma varného reaktoru



# Jaderné palivo



# Aktivní zóna



# Ponorky na jaderný pohon

- 17. ledna 1955 – USS Nautilus

Tlakovodní  
reaktory

Pb-Bi reaktory



# Letadlové lodě na jaderný pohon

- 1961 – USS Enterprise
  - 8 reaktorů, celkem 200 MW



# Jaderné letadlo

- Convair X-6
- 50 letů
- 1955 – 57



- Nikdy neletěl na jaderný pohon

# JE dnes

- 427 jaderných reaktorů v provozu
- 382 796 MWe instalovaný výkon
- 56 jaderných reaktorů ve výstavbě

» <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>

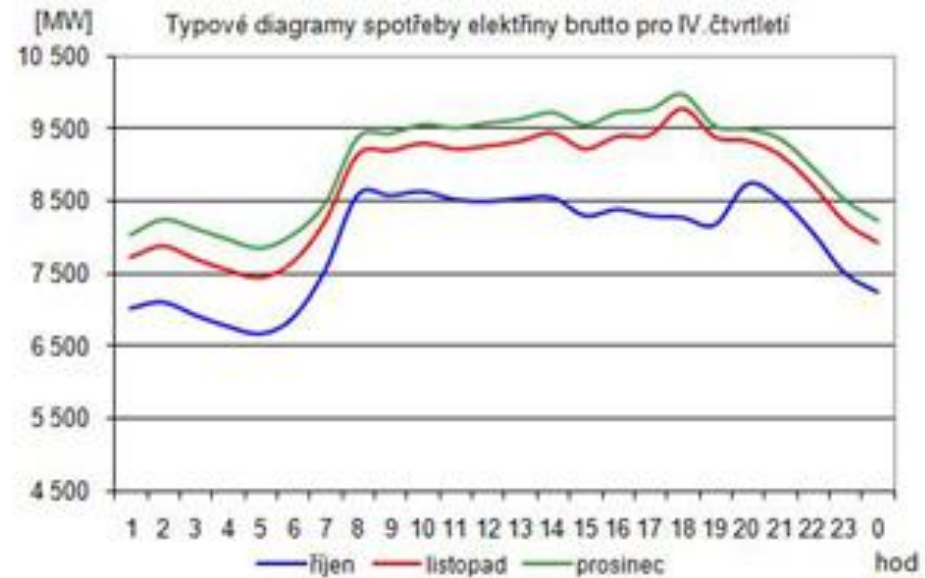
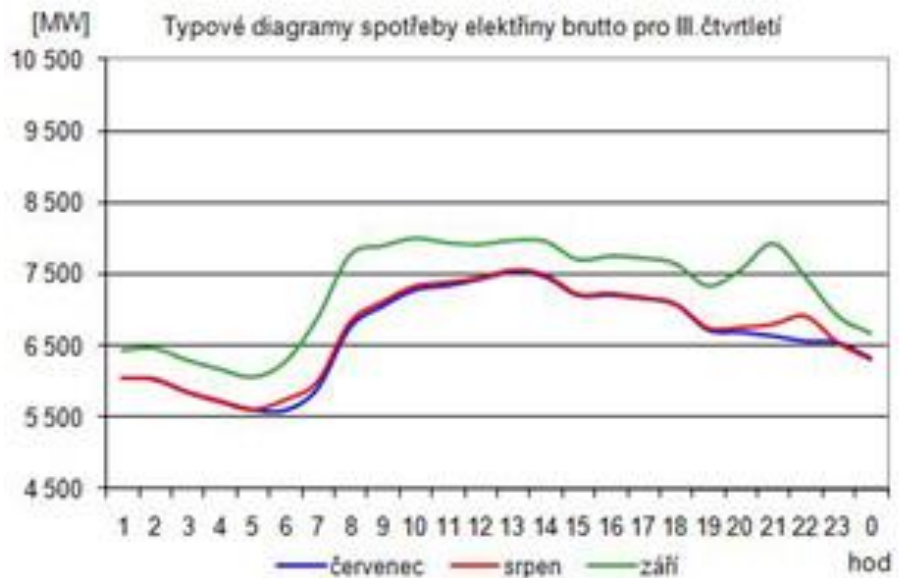
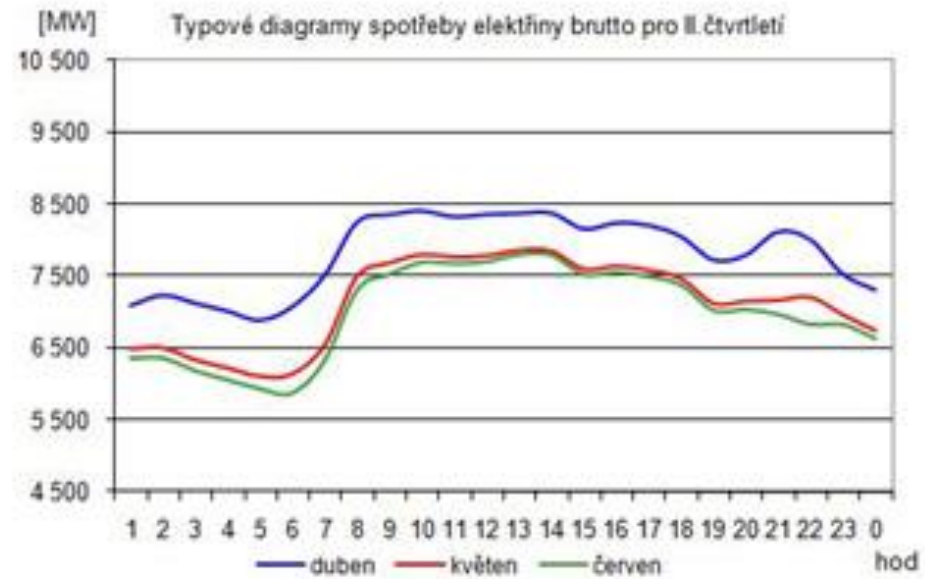
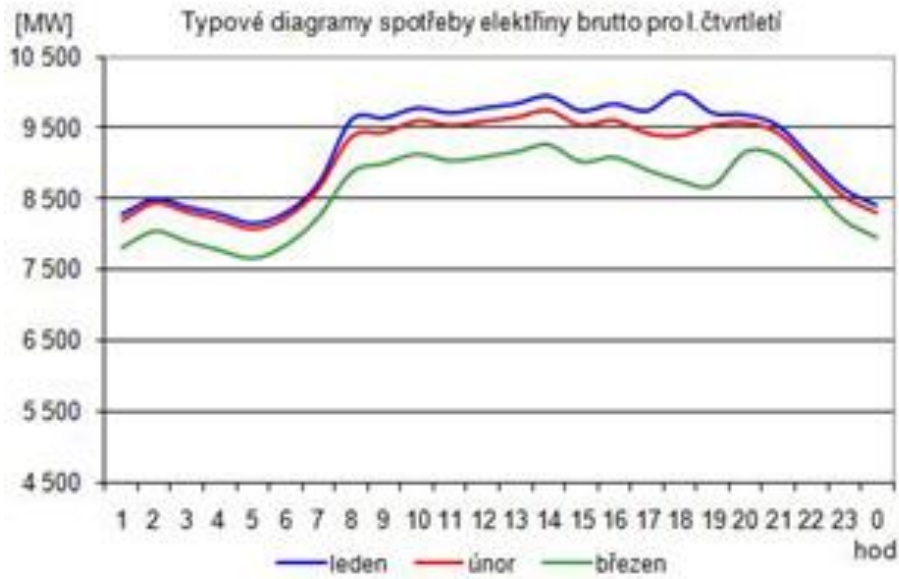


# JE v elektrické síti

- Fungování elektrické sítě
  - Zdroje pro základní zatížení
  - Denní diagram
  - Skladování elektřiny
  - Výrobní náklady
    - JE vs. KE
  - Struktura nákladů na výrobu elektrické energie
    - Odpisy, palivo, údržba, vyřazování z provozu a vyhořelé palivo

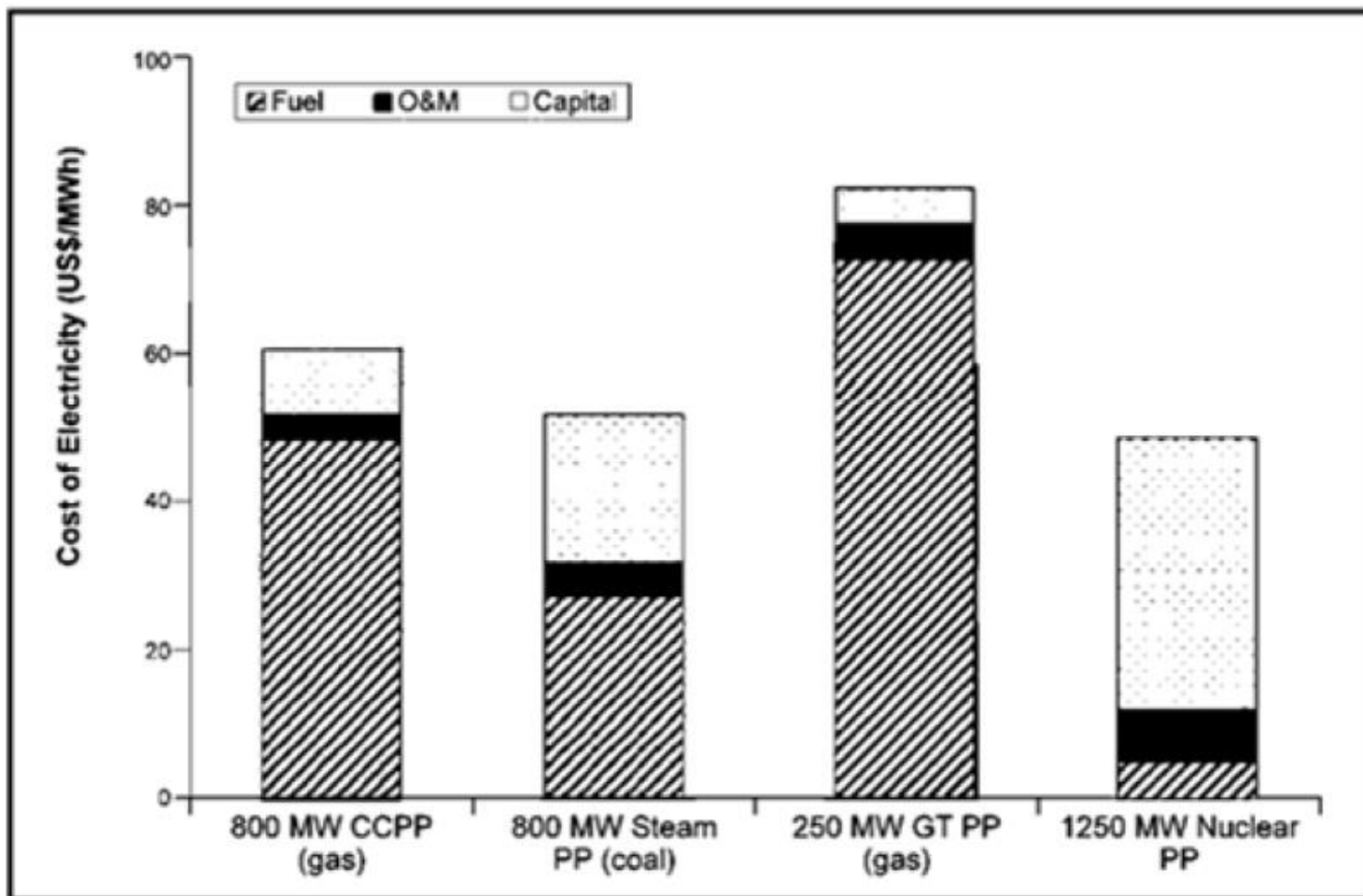
# Denní diagram

Typové diagramy spotřeby elektriny brutto pro jednotlivé měsíce roku



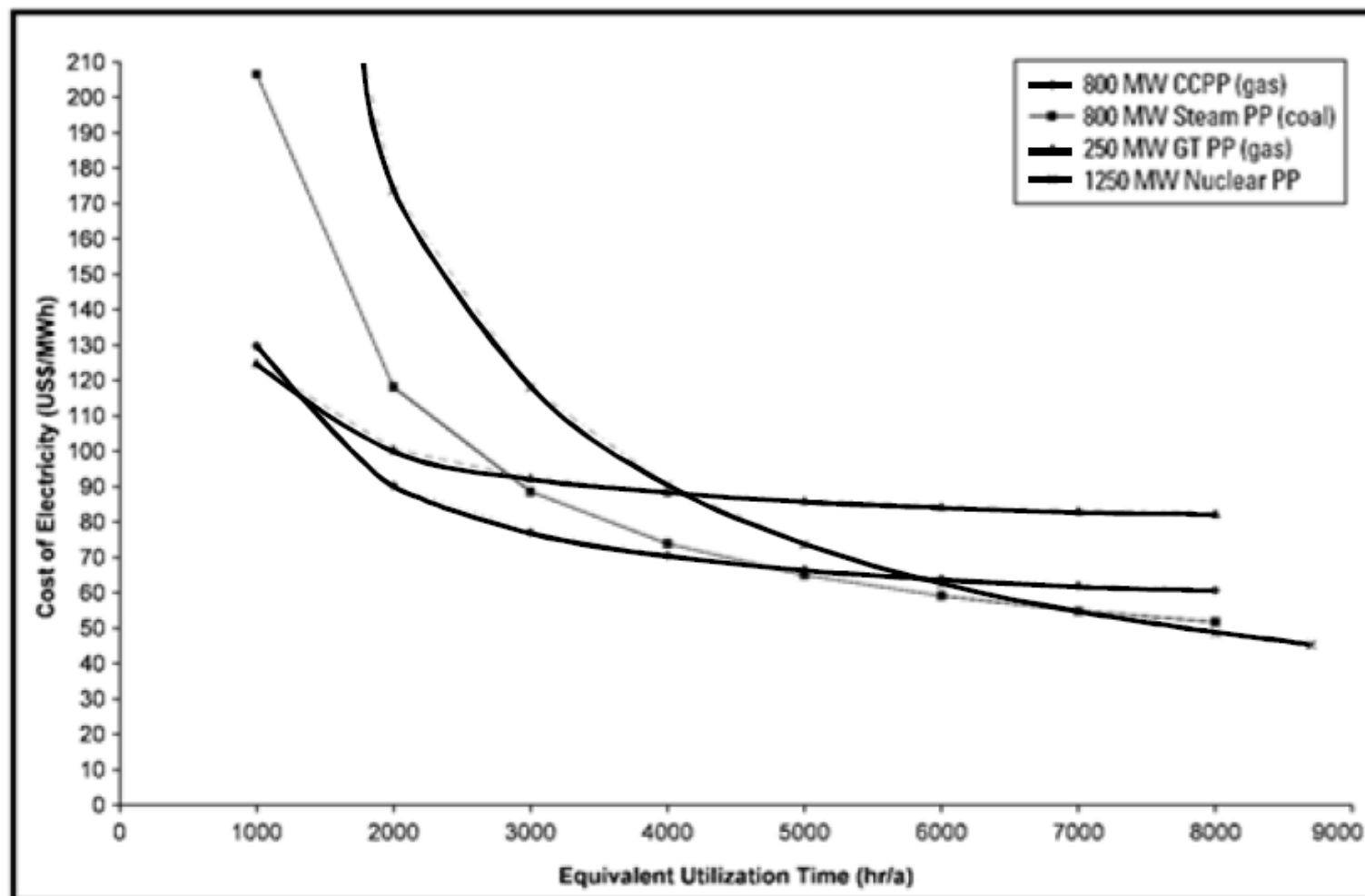
# Porovnání výrobních nákladů na elektřinu

pro elektrárny v základním zatížení s využitím 8000 h/r



# Porovnání výrobních nákladů na elektřinu

vliv doby využití



# Porovnání výrobních nákladů na elektřinu

vliv doby využití – z výpočtů vychází následující optimální volba technologie podle doby využití:

- pod 1500 h/r plynová turbína
- 1500 až 5000 h/r paroplynová elektrárna
- 5000 až 7000 h/r uhelná parní elektrárna
- nad 7000 h/r jaderná elektrárna

# Hlavní výhody jaderné energetiky

- Dlouhodobě stabilní spolehlivé dodávky elektrické energie za predikovatelnou (nízkou) cenu
- Energetická bezpečnost státu
- Minimální dopady na životní prostředí
- Minimální dopady na zdraví obyvatelstva
- Vysoký synergický efekt
- Mezinárodní vizibilita

# Kdo profituje z jaderné energetiky?

- Veškeré **výhody** jaderné energetiky jsou na straně **státu**
- Veškerá **rizika** jaderné energetiky jsou na straně **provozovatele**
- **PROTO STÁT MUSÍ HRÁT VE VYUŽÍVÁNÍ JADERNÉ ENERGETIKY KLÍČOVOU ROLI**

# Obsah

- Jak funguje jaderná elektrárna a její využití
  - Jak funguje jaderná elektrárna, vysvětlení jednotlivých okruhů jaderné elektrárny, elektrizační síť a profil využití jaderné elektrárny.
- **Environmentální aspekty jaderné energetiky**
  - Environmentální aspekty jaderné energetiky, externality výroby elektřiny v jaderných elektrárnách, srovnání s dalšími elektrickými výrobkami
- Jaderné havárie ve světě a v ČSSR
  - Jaderná bezpečnost
  - Jaderné havárie v historii – příčiny, následky, poučení



# Proč jaderná energetika ?

- 1 chemická vazba v uhlí – několik eV
- 1 štěpení uranu – 200 MeV
- Štěpení uranu je 100 000 000 x výkonnější než pálení uhlí
- Důležitý je i objem
  - uran má přibližně 15 x vyšší hustotu než uhlí
- Podíl uranu ve vytěžené rudě
  - Několik procent
- Ztráta při obohacování



# Žijeme s rizikem

- Každá lidská činnost představuje riziko
- Při výrobě elektrické energie umírají lidé, přesto si svůj život bez ní nedokážeme představit a bez elektrické energie by nejspíš umíralo lidí ještě více.
- Naší povinností by mělo být minimalizovat oběti, které svým konáním zapříčiňujeme
- Každý z nás je do jisté míry vrah...

# Ceny elektrické energie

- Výrobní cena, počáteční investice, závislost ceny energie na ceně paliva, odepsání elektrárny, bezpečnost státu

# Co věci, které nejsou v ceně el. energie zahrnuty?

- Ne všechny náklady jsou zahrnuty v ceně výrobku
  - Externí náklady (pozitivní a negativní)
- Projekt ExternE evropské komise se touto problematikou zabývá od roku 1991
- Účastní se ho přes 50 vědeckých týmů z více než 20 zemí
- V současnosti není asi lepší zdroj informací

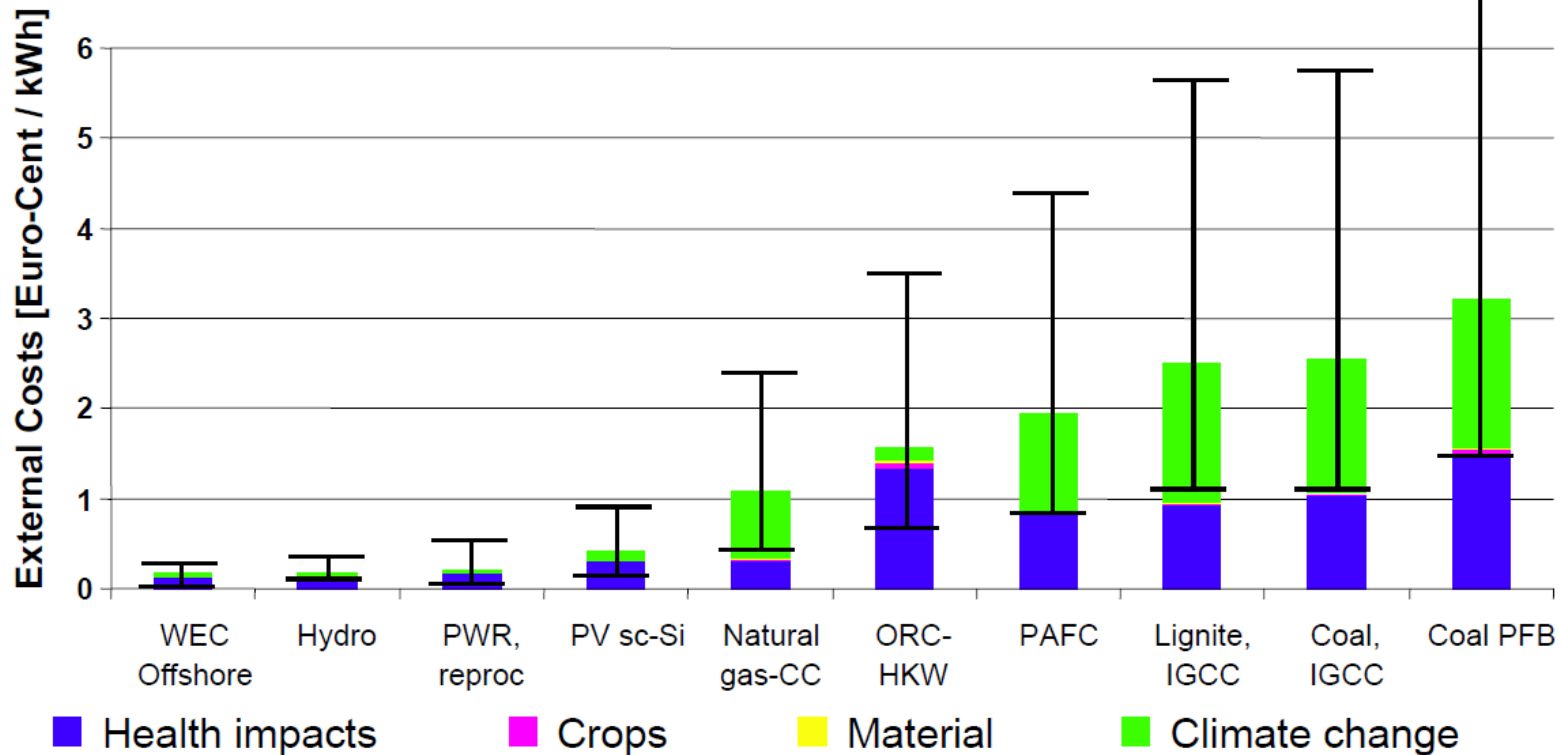
# Externí náklady jednotlivých zdrojů

**IER**

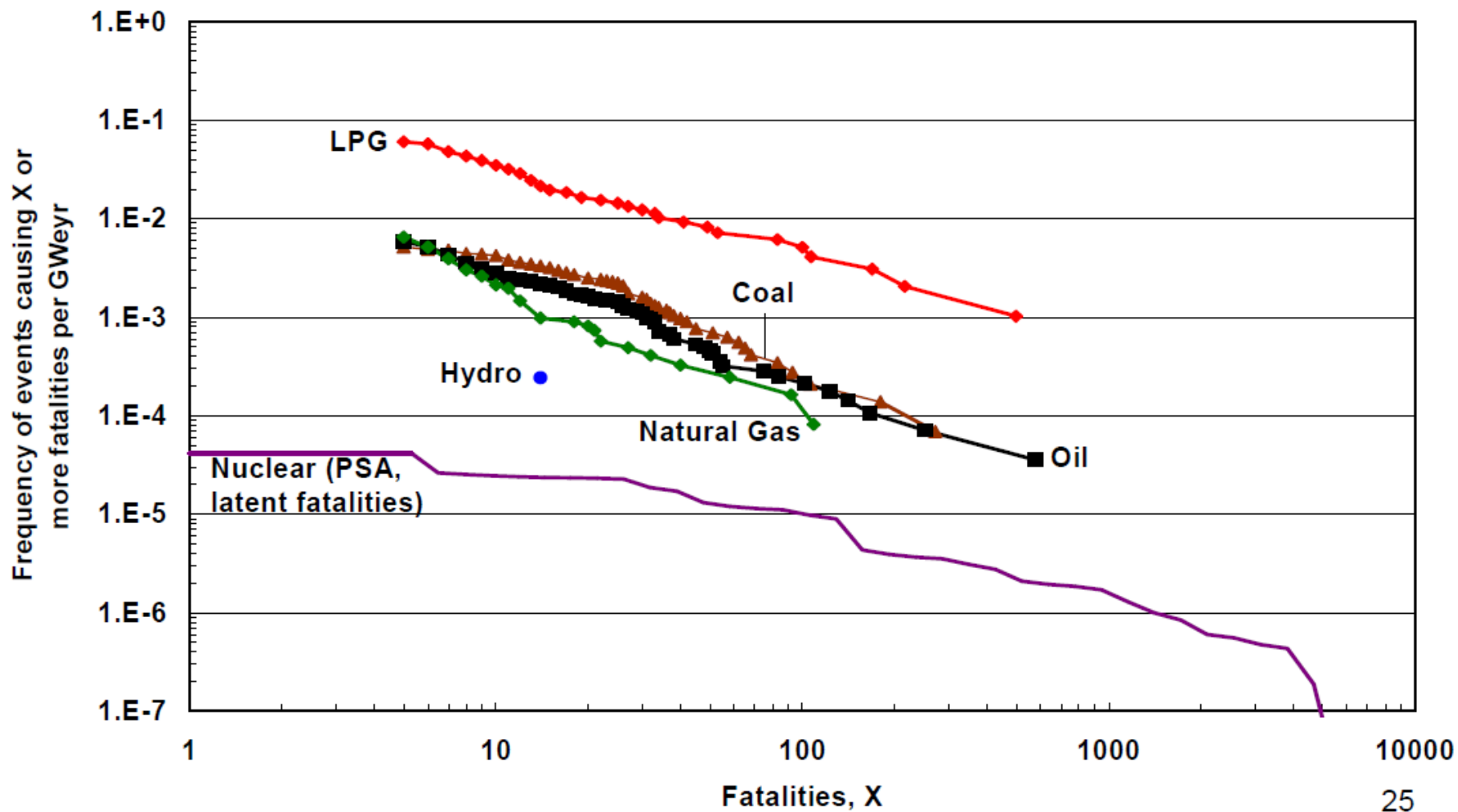
**Externe**

## External Costs of Power Stations [Euro-Cent / kWh]

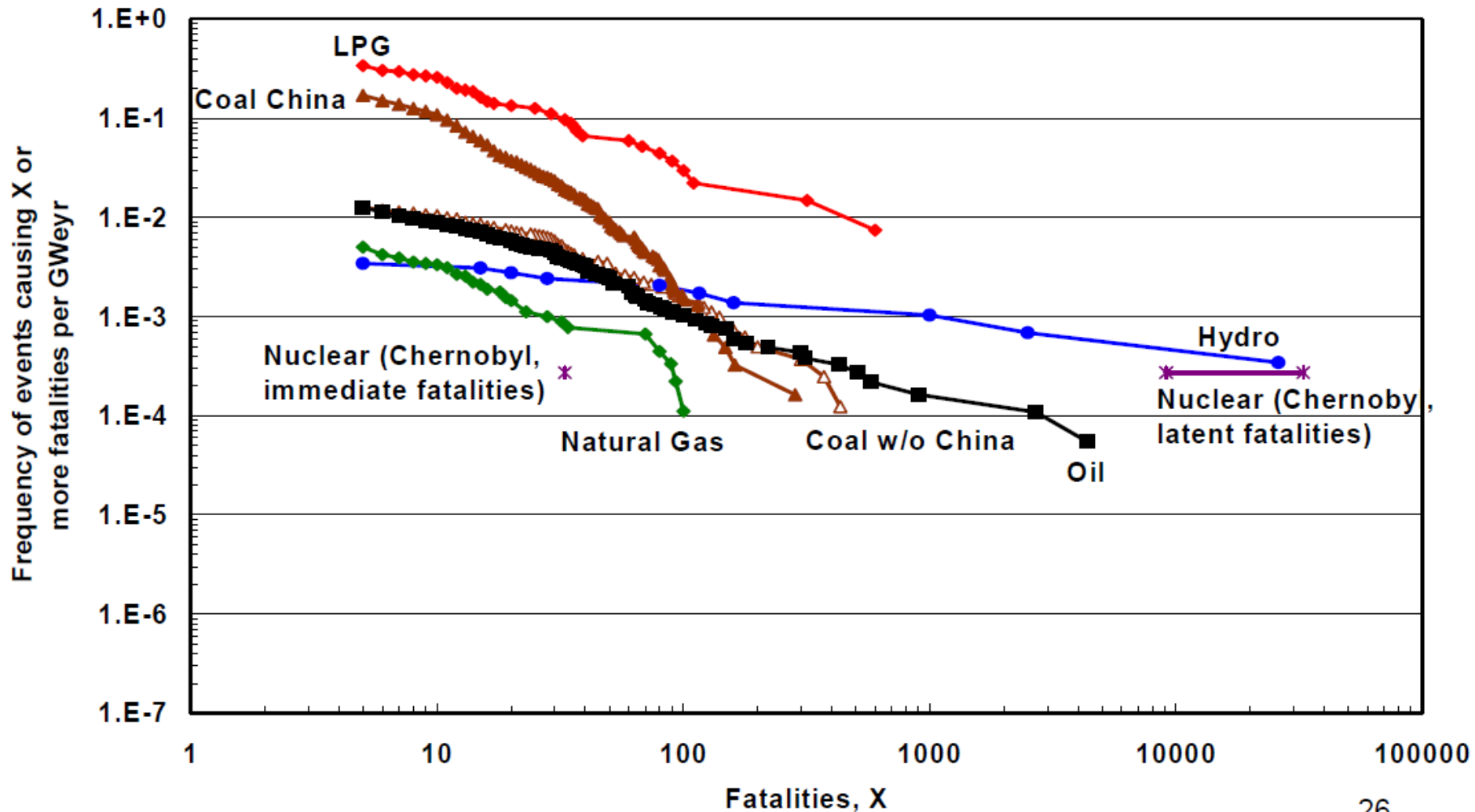
19 Euro/t CO<sub>2</sub>, Nitrates = 0.5 PM<sub>10</sub>, YOLL<sub>chronic</sub> = 50.000 Euro



# Vážné havárie související s energetikou (OECD, 1969 – 2000)



# Vážné havárie související s energetikou (non-OECD, 1969 – 2000)



# Počet mrtvých na 1TWh

ENERGY SOURCE	DEATHS	FATAL/TWH	TWH	NOTES
Coal - world	67,000,000	129	520,000	(26% world energy, 50% of elec.)
Coal - USA/Europe				About ten times safer
Oil	101,000,000	133	720,000	(36% of world energy)
Natural Gas	6,000,000	13	460,000	(21% of world energy)
Biofuel/Biomass		12.00		
Peat		12.00		
Solar (rooftop)	480	0.44	960	(less than 0.1% of world energy)
Wind	1,760	0.15	12,000	(less than 1% of world energy)
Hydro + Banqiao)	195,000	0.84	232,000	(~2500 TWh/yr + 171,000 Banqiao dead)
Nuclear	15,000	0.07	208,000	(5.9% of world energy)
World	180.2 million	60	2,000,000	Terawatt-hours
Unaccounted	10.8 million	60	120,000	TWh = 6.00% ... fatalities prorated

V české republice ročně spotřebujeme něco kolem 70 TWh

- Při našem mixu to představuje zhruba 550 mrtvých ročně – myslete na ně, až si dnes večer rozsvítíte...
  - (546/uhlí+biomasa, 1,7/jádro, 2,4/voda)

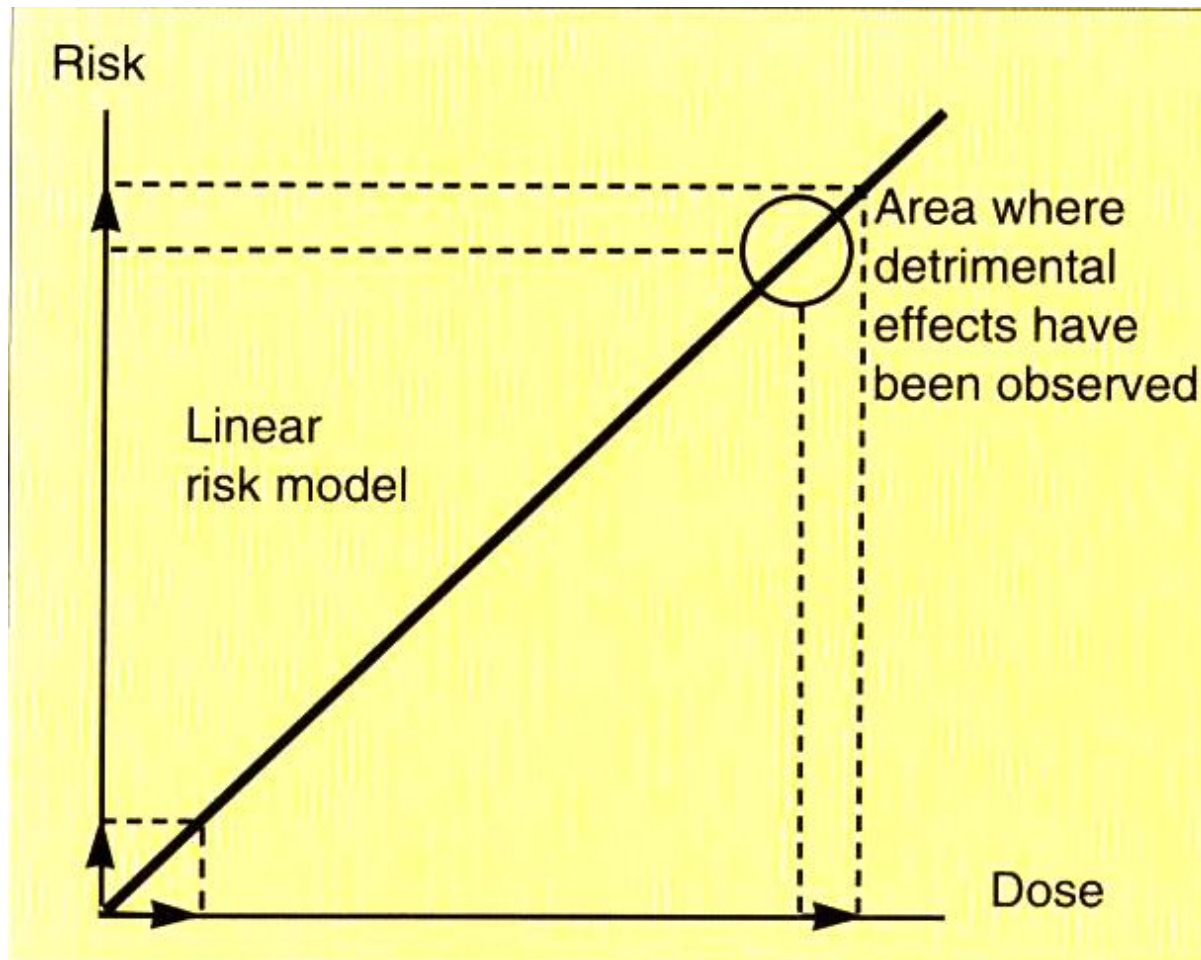


# Mýtus spásy

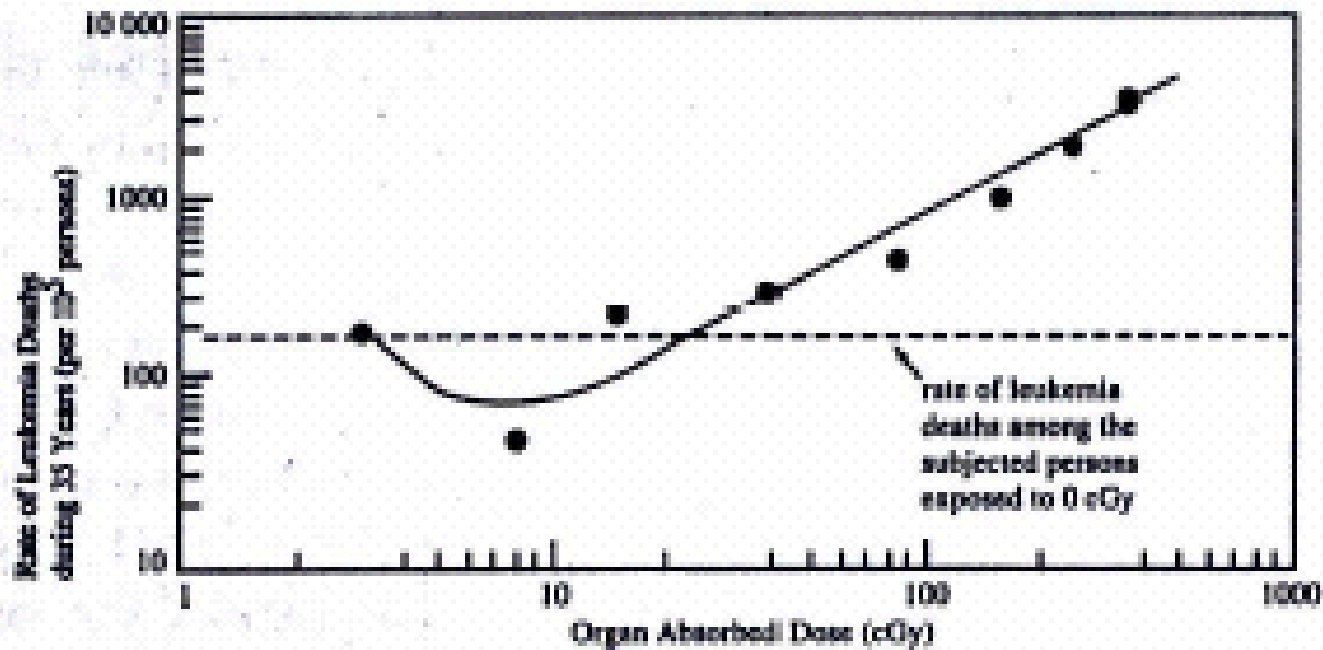
- I když jaderná energetika představuje malé riziko, pořád je to riziko.
- Zastavením jaderných elektráren toto riziko zmizí.
- **OMYL – jaderná energetika nezmizí, ale bude něčím nahrazena.**
- Otázka na každého kdo proti něčemu brojí by měla být – „Jaká je vaše alternativa?“
- Bude ta náhrada představovat menší riziko?

# Princip ALARA

## Linear risk model

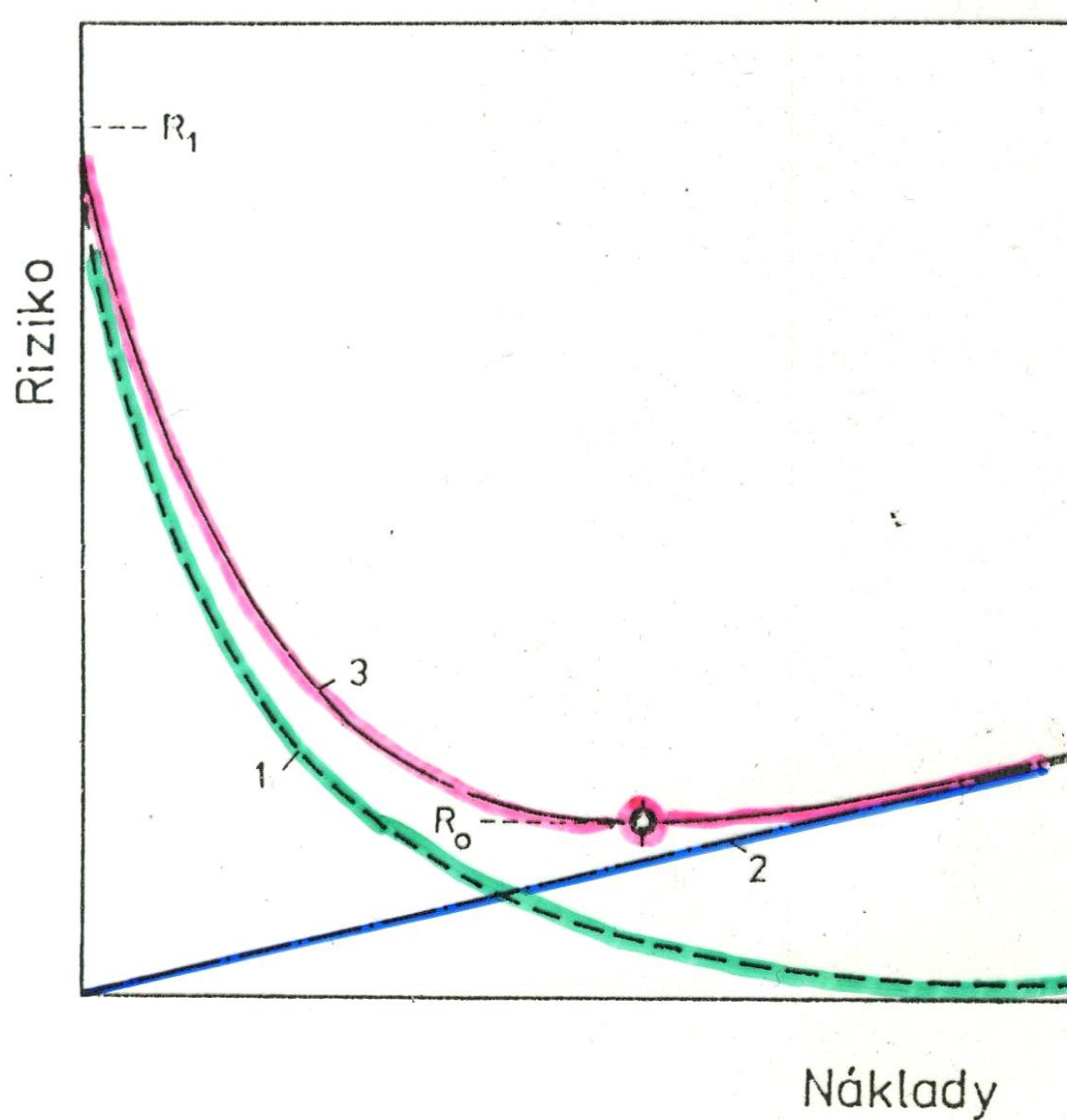


# Pozitivní vliv malých dávek ? (radiační hormeze)

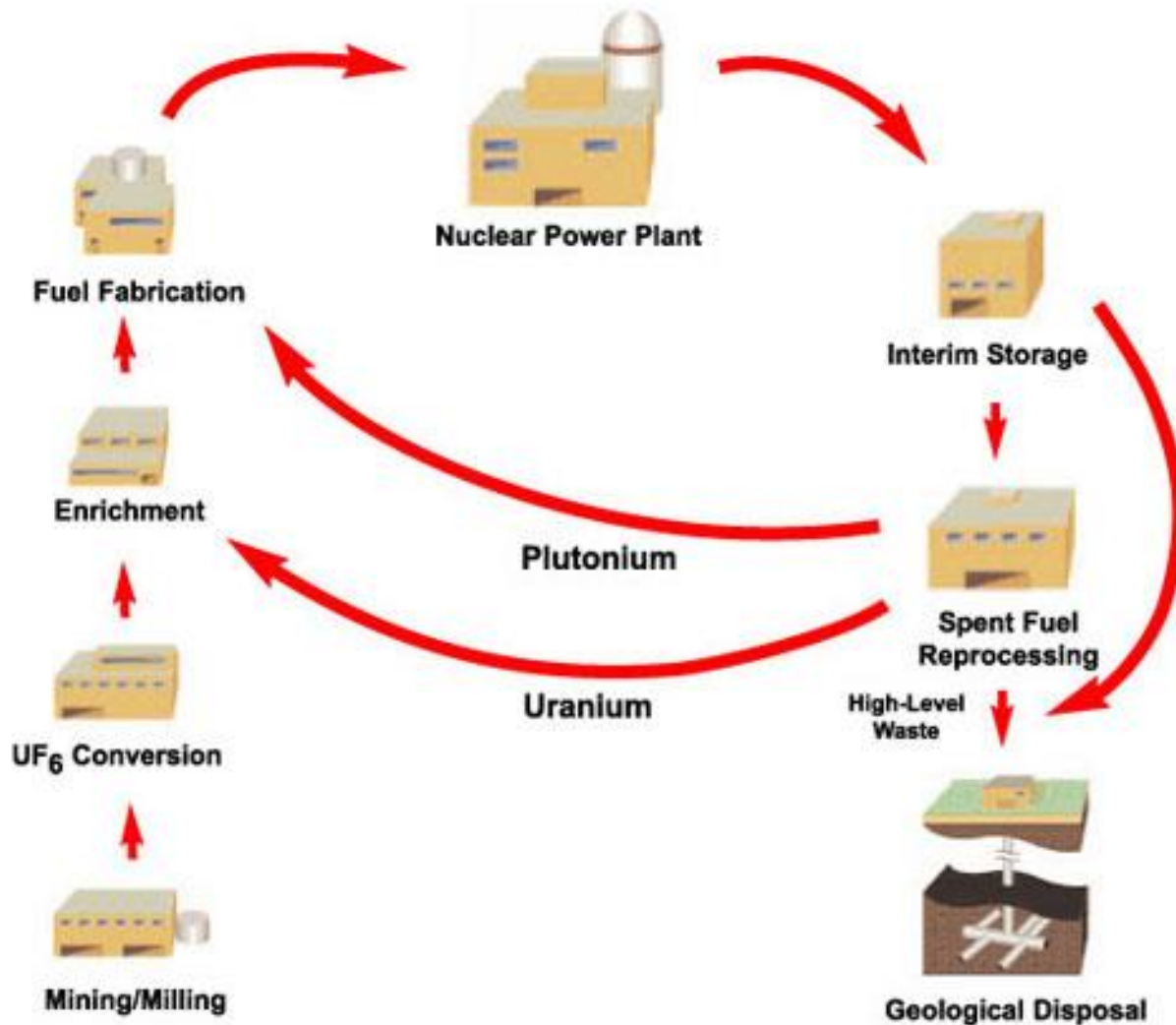


*Obr. 1 Úmrtnost na leukémii v závislosti na dávce u osob, které přežily atomové bombardování v Japonsku*

*Závislost rizika na vynaložených nákladech.*



# Palivový cyklus JE



# Problém jaderného odpadu

- Vyhořelé palivo z jaderné elektrárny tvoří méně než **1 % objemu** všech jaderných odpadů na světě, avšak obsahuje přes **90 % veškeré radioaktivity**.
- I když bývá vyhořelé jaderné palivo považováno za odpad, může se stát cenným zdrojem surovin nebo jaderným palivem pro **jiný typ jaderné elektrárny**.
- Obě české jaderné elektrárny během celé doby svého provozu vyprodukují celkem **cca 3 000 tun** vyhořelého jaderného paliva.
- Často se hovoří o likvidaci vyhořelého paliva, zatím však jde jen o jeho **bezpečné uložení** na místo, kde se přirozenými radioaktivními přeměnami zlikviduje samo, problémem je že to **může trvat velmi dlouho**.

# Dělení radioaktivních odpadů

- **Nízkoaktivní** - obvykle zbytky málo kontaminovaných materiálů
  - Nízkoaktivní odpady tvoří asi 90 % veškerých radioaktivních odpadů.
  - Jedná se o zbytky z radioaktivních provozů, jako jsou drtě, kovy, papírové a plastické obaly, nářadí a ochranné oděvy tvoří objemově značnou část radioaktivních odpadů jako celku.
  - Tyto látky lze ukládat do povrchových úložišť. Spalitelná část těchto odpadů bývá před uložením zpopelněna. Poločas rozpadu nízkoaktivních odpadů je zhruba 30 let.
- **Středně aktivní** - více kontaminované materiály
  - Tento odpad nemůže být zařazen do kategorie nízkoaktivního odpadu, ale zároveň nevyžaduje speciální zacházení jako vysokoaktivní odpad.
  - Při manipulaci a přepravě středně aktivního odpadu je nutné stínění, ale uvolňované teplo je malé.
  - Jedná se o servisní materiály, jako jsou povlaky paliva, konstrukční materiály palivových souborů, nečistoty ve formě kalů, náplně kolon chemické úpravy chladičů, moderátorů, ale i zařízení na úpravu vyhořelého paliva.
  - Některé z těchto odpadů vyžadují trvalé uložení v hlubinném geologickém úložišti, v ostatních případech je možné použít úložiště povrchového typu.
- **Vysoce aktivní** - například vyhořelé jaderné palivo či zbytky po jeho přepracování
  - Tento odpad uvolňuje značné množství tepla - vyžaduje chlazení a stínění.
  - Více než 90 % tohoto druhu odpadu tvoří vyhořelé palivové články z jaderných elektráren.
  - Zásadním nebezpečím vysoce aktivních odpadů je velká koncentrace radioaktivních a extrémně dlouhodobých radionuklidů, s poločasem rozpadu sto tisíc i více let.
  - Odborníci uvádějí, že nejnebezpečnější doba je prvních zhruba 300 let.
  - Ze všech radioaktivních odpadů představují vysoce aktivní odpady nejmenší množství co do objemu, ale obsahují 90 % veškeré radioaktivity.

# Způsoby uložení vysoce aktivního jaderného odpadu

- Jaderný odpad se dočasně ukládá **na 40-50 let do meziskladů**,
- dále do **vodních bazénů u jaderných reaktorů** nebo mimo ně,
- využívá se také tzv. **suché skladování** ve stíněných ocelových stíněných kontejnerech, popř. v betonových sklípcích nebo betonových kontejnerech.
- Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody a její využití se řídí lokálními potřebami jednotlivých jaderných elektráren.
- Definitivní uložení jaderného odpadu umožní **hlubinná úložiště**.



# Mezisklad vyhořelého paliva



- 2 kontejnery CASTOR – 1 rok provozu JE Temelín

# Mezisklad vyhořelého paliva



# Hlubinné úložiště

- Musí představovat bariéry bránící úniku radioaktivních látek do okolí.
- Inženýrské bariéry jsou tvořeny
  - vlastní konstrukcí úložiště,
  - způsobem ukládání odpadů do úložiště
  - obalem nebo matricí, do nichž jsou odpady vloženy a ukládány.

# Umístění úložiště

- Přírodní bariérou při ukládání radioaktivního odpadu jsou **geologické vlastnosti prostředí**, ve kterém je úložiště radioaktivního odpadu situováno.
- Při výběru lokality jsou přitom velmi **přísně posuzována zákonem** stanovaná kritéria pro umístění těchto zařízení.
- Úložiště jaderného odpadu nemůže být umístěno např. v zátopové nebo krasové oblasti, v oblastech, kde by jeho přítomnost mohla mít znehodnocující vliv na zásoby podzemních či minerálních vod apod.
- Příznivými charakteristikami pro umístění jsou nepropustnost podloží, dostatečná vzdálenost od vodních toků nebo ploch a dostatečná vzdálenost od míst trvalého osídlení.

# Problémy hlubinných úložišť

Problémem tohoto způsobu likvidace = uložení je, že:

- celé úložiště musí monitorováno po celou dobu provozu, resp. dokud neklesne aktivita materiálů pod bezpečnou úroveň.
- To představuje ekonomickou zátěž.

# Jiné možnosti

- Přepracovat a dále použít v reaktorech
  - ekonomicky nevýhodné,
- Transmutovat
  - cílené jaderné reakce, které vytvoří z radionuklidů nuklidy stabilní.
  - ADTT
  - MSR

## Chemické přepracování vyhořelého paliva

Vyhořelé palivové články z dnešních jaderných elektráren stále ještě **obsahují přes 95% nevyhořelého uranu** (z toho přibližně 1%  $^{235}\text{U}$ ) a dále pak další štěpitelné prvky jako například **plutonium**.

- Pouze **3%** vyhořelého paliva připadá na štěpné fragmenty a transurany - tedy na prvky, které představují **skutečný odpad**.

# Třídění složek vyhořelého paliva

- **Plutonium** se opět použije jako **palivo**.
- **Uran** se uskladní nebo použije pro výrobu nového **paliva**.
- **Zbytky kovového pokrytí** palivových článků se zpracují jako **středněaktivní odpad**.
- **Štěpné produkty** se oddělují a vitrifikují (zataávají do skla). Z jedné tuny vyhořelého paliva tak vznikne pouze 115 litrů **vysokoaktivního jaderného odpadu** převedeného do formy skla.
- Takovéto přepracovávací závody existují například ve francouzském Marcoule, či anglickém Sellafieldu.
- Jejich nevýhodou je poměrně malá kapacita a ne náročný provoz.



# Ekonomie využití vyhořelého paliva

- V současné době je stále levnější těžba nového uranu, než přepracovávání použitého jaderného paliva z jaderných elektráren.
- Uran z mořské vody

# Uložení nízkoaktivních a středněaktivních radioaktivních odpadů

## Prvotní zpracování

- Nízkoaktivní a středněaktivní radioaktivní odpad z JE Dukovany a JE Temelín jsou předávány k uložení ve zpevněné formě nebo ve schválených obalech.
- Technologie bitumenace, použitá na úpravu kapalných radioaktivních odpadů v obou jaderných elektrárnách, zaručuje dlouhodobou stabilní ochranu proti účinkům radiace.
- Pevné radioaktivní odpady pocházející z kontrolovaného pásma jsou tříděny podle svých charakteristických vlastností.
- Tento způsob nakládání umožňuje průkaznější určení radionuklidů, kterými jsou odpady kontaminovány.

# Uložení nízkoaktivních a středněaktivních radioaktivních odpadů

## Konečná úprava

- Odpady jsou po přípravě skladovány a před konečnou úpravou se lisují do sudů o objemu 200 litrů. Konečná úprava probíhá kampaňovitě, sudy s předlisovaným odpadem jsou slisovány vysokotlakým lisem.
- Výlisky jsou umístěny do větších sudů (tzv. overpak o objemu 300 až 400 litrů) a takto ukládány do úložiště radioaktivních odpadů.
- Výsledná redukce objemu je šestinásobná. Vytríděná neaktivní část odpadů je zneškodněna konvenčními způsoby, které jsou používány při nakládání s neaktivními odpady.

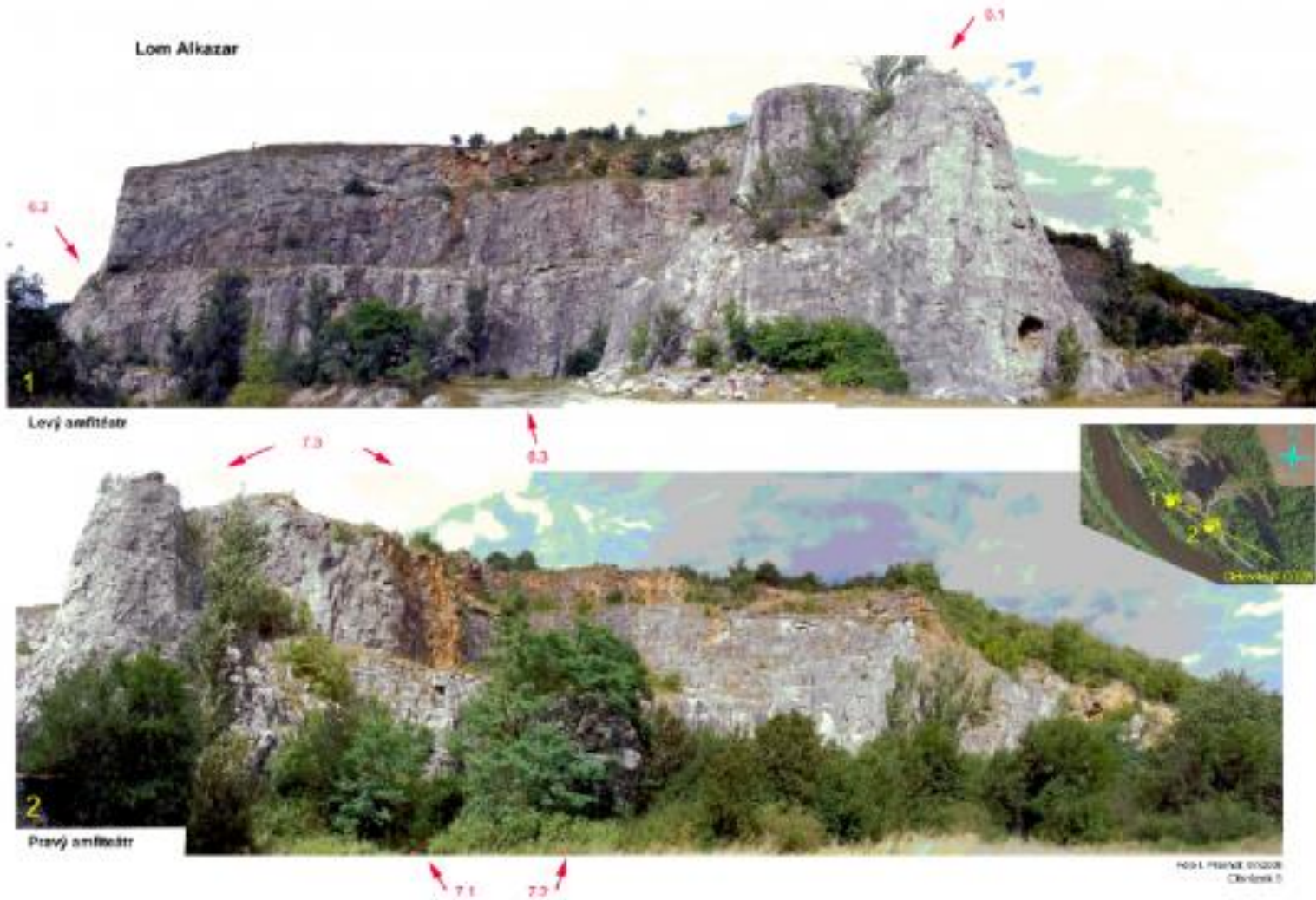
# Úložiště nízkoaktivních RAO Dukovany







# Uložení nízkoaktivních a středněaktivních radioaktivních odpadů



# Likvidace jaderné elektrárny.

- Samotná jaderná elektrárna rovněž jednou doslouží.
- Nelze ji jednoduše rozebrat, protože řada konstrukčních prvků může být radioaktivních.
- Jsou tedy dvě možnosti,
  - buď elektrárnu rozebrat a s radioaktivními komponentami naložit stejně jako s vyhořelým palivem nebo
  - celou elektrárnu zakonzervovat a monitorovat, což stojí další náklady na zařízení, které není v provozu.



# Obsah

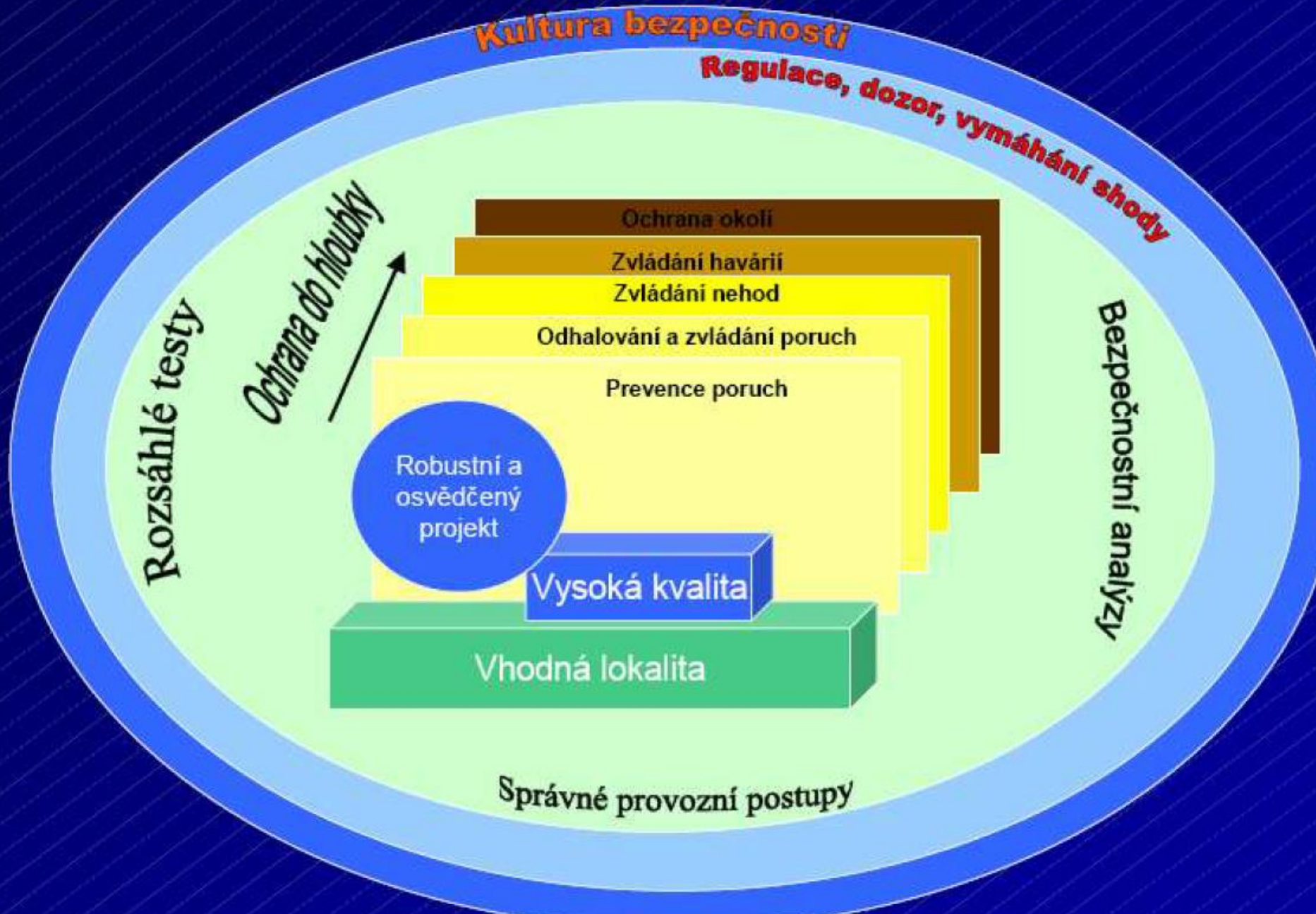
- Jak funguje jaderná elektrárna a její využití
  - Jak funguje jaderná elektrárna, vysvětlení jednotlivých okruhů jaderné elektrárny, elektrizační síť a profil využití jaderné elektrárny.
- Environmentální aspekty jaderné energetiky
  - Environmentální aspekty jaderné energetiky, externality výroby elektřiny v jaderných elektrárnách, srovnání s dalšími elektrickými výrobkami
- **Jaderné havárie ve světě a v ČSSR**
  - Jaderná bezpečnost
  - Jaderné havárie v historii – příčiny, následky, poučení

# Definice jaderné bezpečnosti

- Cílem jaderné bezpečnosti zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce a zabránit nedovoleným únikům radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí.

# Ochrana do hloubky

- Bariéry
  - Organizační, fyzické
- Redundance
- Diverzifikace
- Separace



**Kultura bezpečnosti**

**Regulace, dozor, vymáhání shody**

Ochrana okolí

Zvládání havárií

Zvládání nehod

Odhalování a zvládání poruch

Prevence poruch

Robustní a osvědčený projekt

Vysoká kvalita

Vhodná lokalita

Správné provozní postupy

Rozsáhlé testy

Ochrana do hloubky

Bezpečnostní analýzy

ZÁSAHY  
BEZPEČNOSTNÍCH A  
OCHRANNÝCH  
SYSTÉMŮ

ŘÍDÍCÍ SYSTÉMY  
BĚŽNÉHO PROVOZU

PRODUKTY ŠTĚPENÍ



VŠEOBECNÉ PROSTŘEDKY OCHRANY:  
KONZERVATIVNÍ PROJEKT, ZAJIŠTĚNÍ JAKOSTI  
A CELKOVÁ BEZPEČNOSTNÍ KULTURA

PRVNÍ BARIÉRA: MATRICE PALIVA

DRUHÁ BARIÉRA: POKRYTÍ PALIVOVÝCH PROUTKŮ

TŘETÍ BARIÉRA: KONSTRUKCE PRIMÁRNÍHO OKRUHU

PRVNÍ ÚROVEŇ: PREVENCE ODCHYLEK OD NORMÁLNÍHO PROVOZU

DRUHÁ ÚROVEŇ: ŘÍZENÍ V PODMÍNKÁCH ODCHYLEK OD NORMÁLNÍHO PROVOZU

TŘETÍ ÚROVEŇ: SYSTÉM KONTROLY A ŘÍZENÍ V HAVARIJNÍCH PODMÍNKÁCH

ČTVRTÁ BARIÉRA: KONTEJNMENT (OCHRANNA OBÁLKA)

ČTVRTÁ ÚROVEŇ: ŘÍZENÍ ČINNOSTÍ PŘI HAVÁRIÍCH VČETNĚ UDRŽENÍ CELISTVOSTI KONTEJNMENTU

PÁTÁ ÚROVEŇ: OPATŘENÍ VNĚJŠÍCH HAVARIJNÍCH PLÁNŮ

# Klasifikace havárií

- Fyzikální přístup
  - I. třída: Havárie vyvolané kladnou změnou reaktivity
  - II. třída: Havárie se ztrátou chladiva
  - III. třída: Havárie v systému odvodu tepla
  - IV. třída: Ostatní havárie
  - V. třída: Vnější vlivy

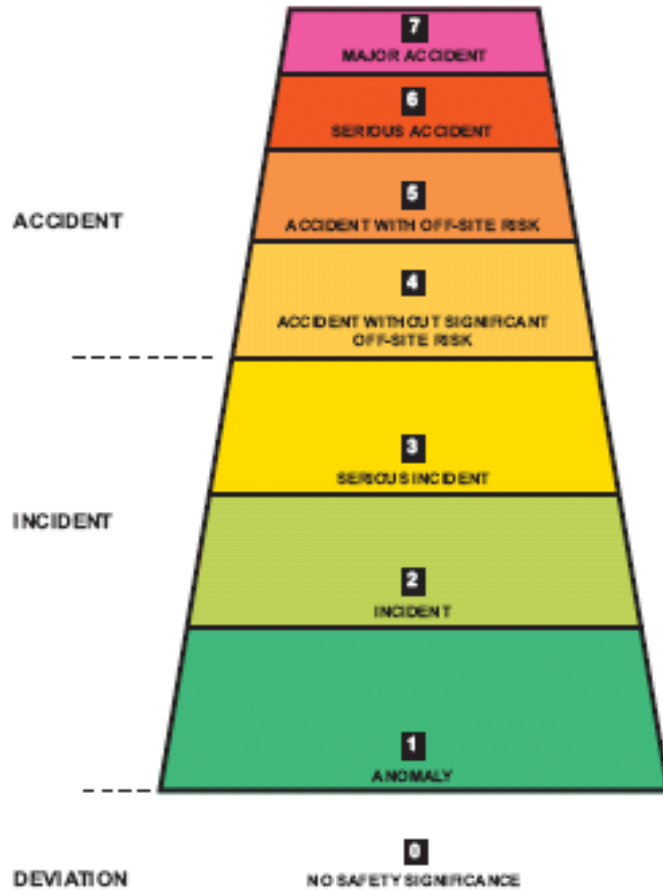
# Mezinárodní stupnice INES

- Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí (The International Nuclear Event Scale – INES)
- Slouží k rychlé orientaci veřejnosti o závažnosti, rozsahu a následcích havárií, poruch, nehod a odchylek provozu od nominálního stavu.
- Nenahrazuje povinnost provozovatele provést důkladnou analýzu příčin a následků událostí.
- Stupnici INES zavedla IAEA v r. 1991.



# The International Nuclear Event Scale

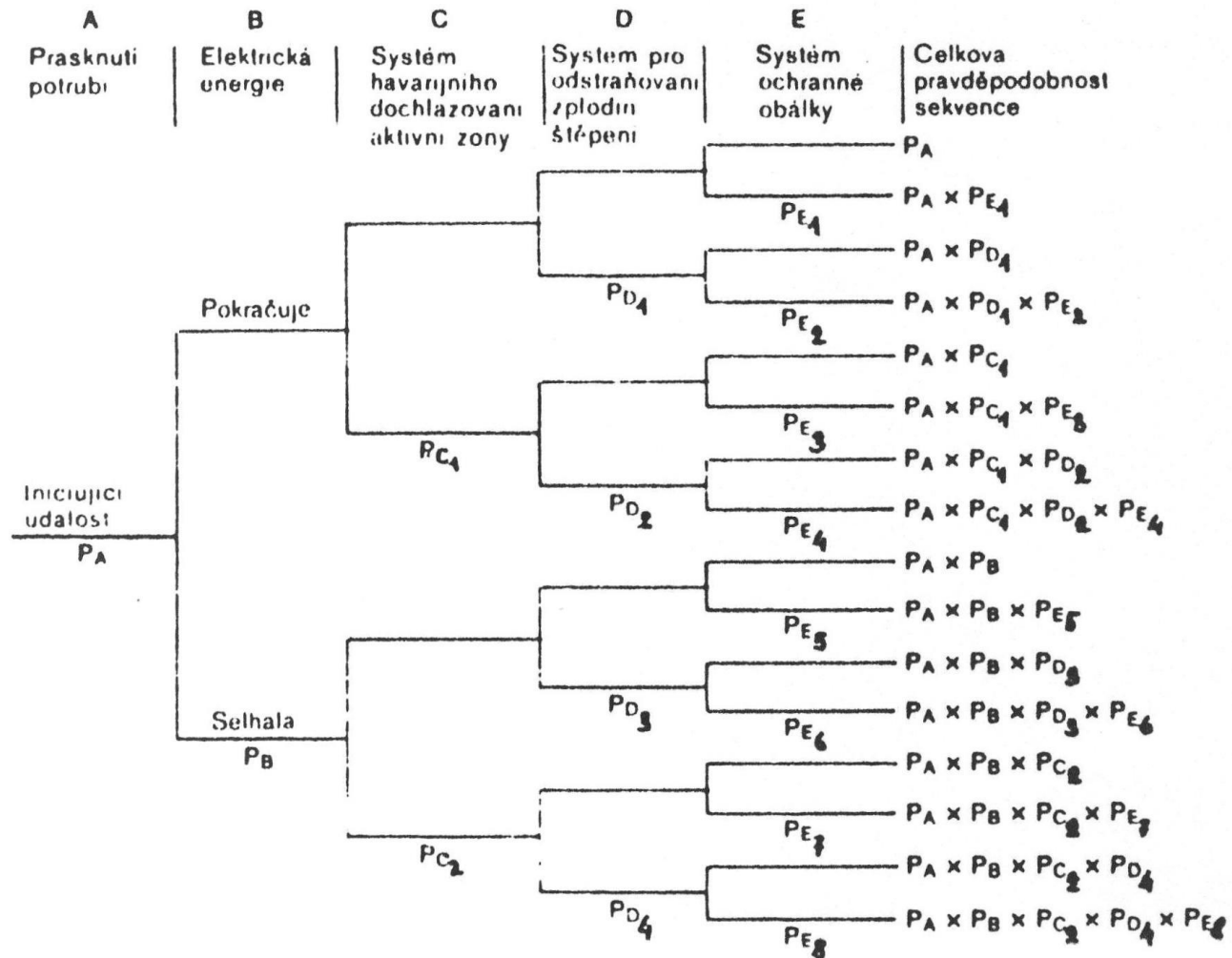
For prompt communication of safety significance



	KRITÉRIA NEBO BEZPEČNOSTNÍ ATRIBUTY		
	Důsledky mimo hranici jaderného zařízení	Důsledky uvnitř hranice jaderného zařízení	Narušení hloubkové ochrany
7 VELMI TĚŽKÁ HAVÁRIE	značné uvolnění radioaktivních látek, velké účinky na zdraví a životní prostředí		
6 TĚŽKÁ HAVÁRIE	významné uvolnění radioaktivních látek, pravděpodobně úplná realizace havarijních plánů		
5 HAVÁRIE S RIZIKEM ÚČINKŮ MIMO HRANICE ZAŘÍZENÍ	omezené uvolnění radioaktivních látek, pravděpodobně částečná realizace havarijních plánů	velké poškození aktivní zóny reaktoru a radiačních bariér	
4 HAVÁRIE BEZ VÝZNAMNÉHO RIZIKA NA OKOLÍ	malé uvolnění radioaktivních látek, ozáření obyvatelstva je v rámci povolených limitů	významné poškození aktivní zóny reaktoru, radiačních bariér, smrtelné ozáření zaměstnanců	
3 VÁŽNÁ NEHODA	velmi malé uvolnění radioaktivních látek, ozáření obyvatelstva představuje zlomek z povolených limitů	velká kontaminace, akutní účinky na zdraví zaměstnanců	téměř havarijní stav, nezbývají žádné bezpečnostní zábrany
2 NEHODA		významná kontaminace, nadměrné ozáření zaměstnanců	nehody s významným narušením bezpečnostních opatření
1 ANOMÁLIE			anomálie od povoleného provozního režimu
0 UDÁLOST POD STUPNICÍ ODCHYLKA	Bez bezpečnostního významu		
UDÁLOST MIMO STUPNICI	Nesouvisí s bezpečností		

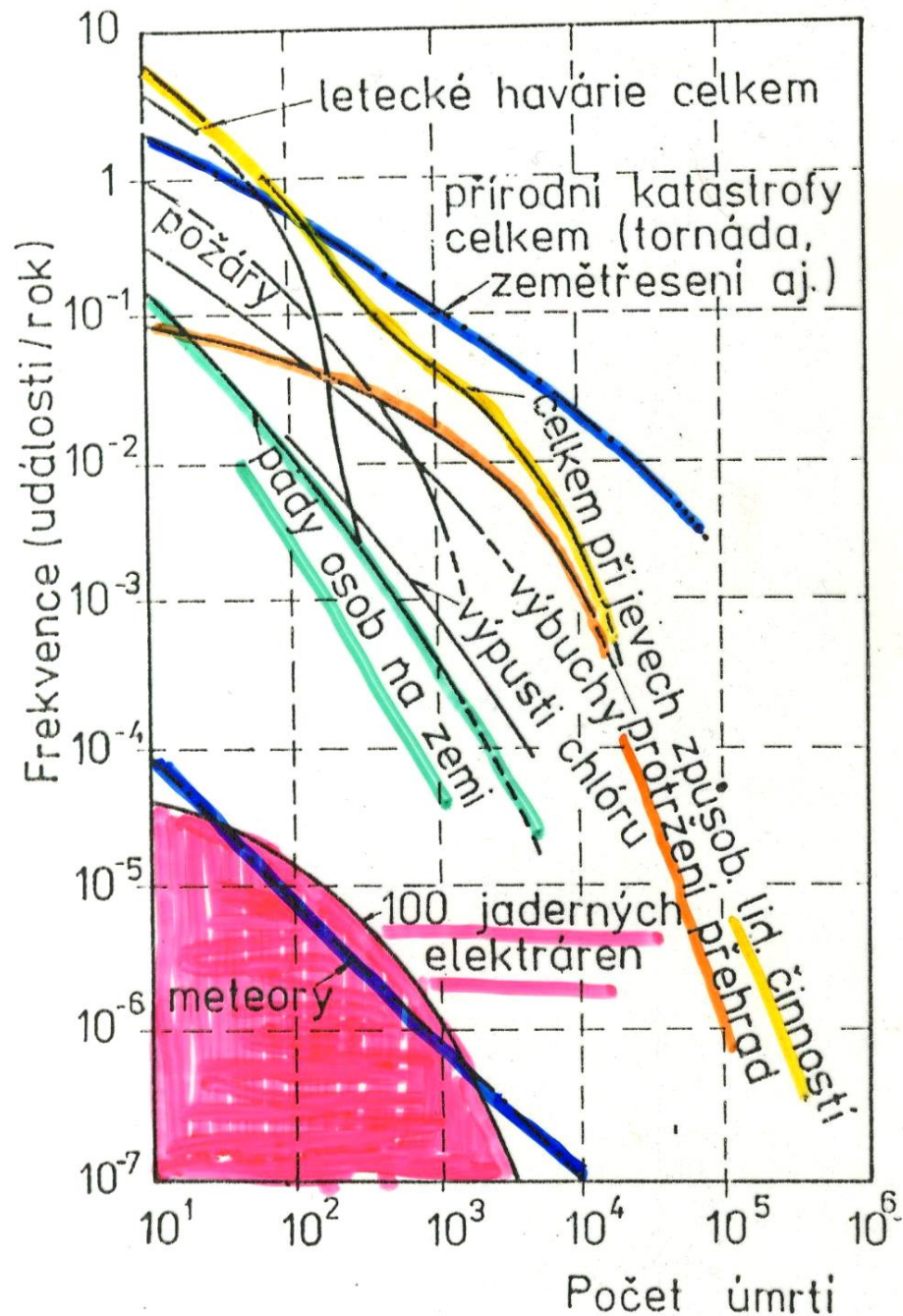


# Analýza pomoci stromu událostí - příklad



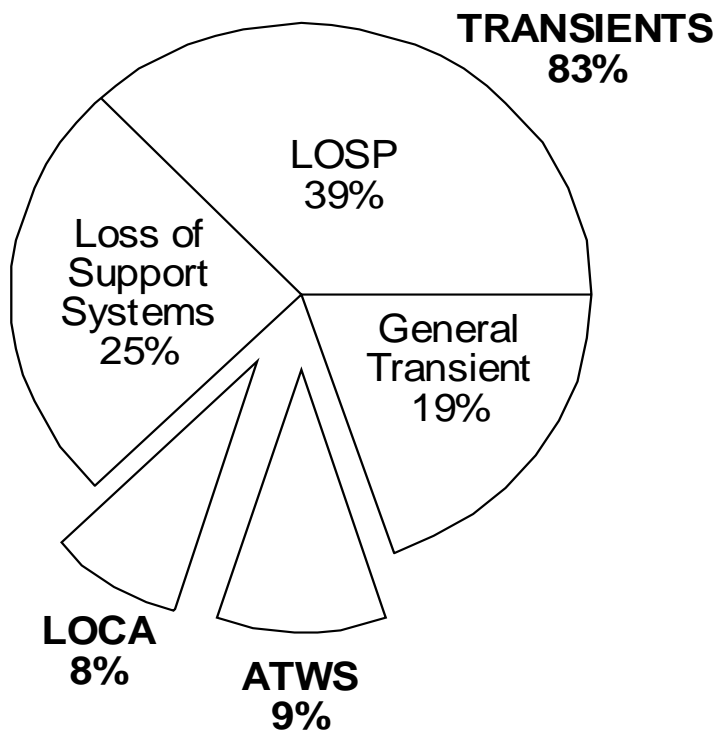
# Výsledky Rasmussenovy studie bezpečnosti 100 amerických jaderných elektráren

*Riziko v důsledku havárie  
je srovnatelné s rizikem  
způsobeným pádem  
meteoritu.*



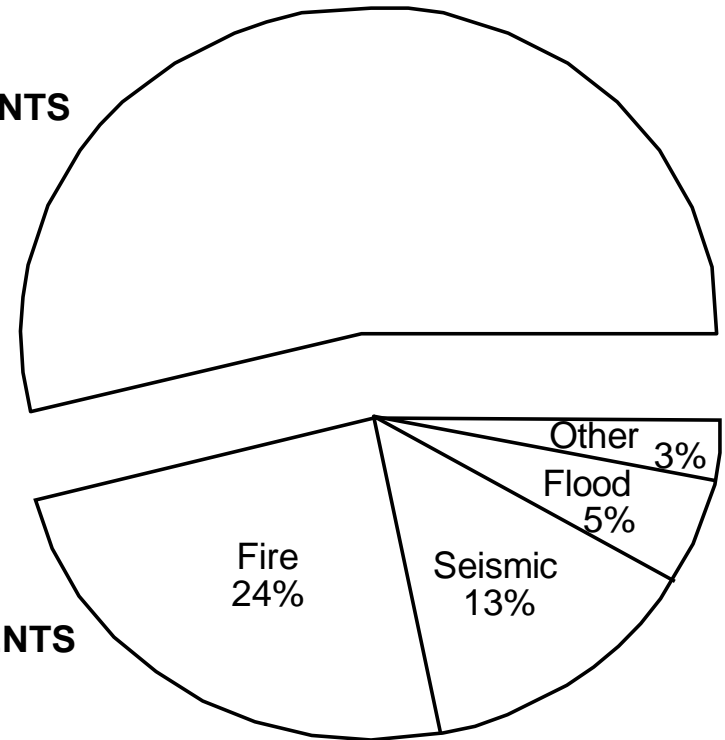
# Analýza bezpečnosti

- Deterministická analýza
- PSA/PRA



INTERNAL EVENTS  
55%

EXTERNAL EVENTS  
45%



# Kvantitativní bezpečnostní cíle US NRC

- **Časné a latentní riziko úmrtí na rakovinu** pro jednotlivce žijícího v okolí elektrárny **nesmí být vyšší, než 0.1 procenta přirozeného** rizika úmrtí při nehodách nebo na rakovinu.
- **Riziko časného úmrtí jednotlivce:** očekávaná velikost rizika pro průměrného jednotlivce v oblasti od hranice elektrárny do okruhu 1609.3 m (1 míle) **nižší než  $5 \times 10^{-7}$  za rok.**
- **Latentní riziko úmrtí jedince na rakovinu:** očekávaná velikost rizika latentního úmrtí na rakovinu pro průměrného jednotlivce v oblasti od hranice elektrárny do okruhu 16,093m (10 mil) **nižší než  $2 \times 10^{-6}$  za rok.**

# Doplňkové cíle

- Očekávaná pravděpodobnost tavení paliva
  - CDF <  $10^{-4}$  /reaktor/rok.
- Očekávaná pravděpodobnost porušení kontejnmentu < 0.1.
- Pravděpodobnost velkého brzkého úniku
  - LERF <  $10^{-5}$  /reaktor/rok.

# Vybrané jaderné havárie

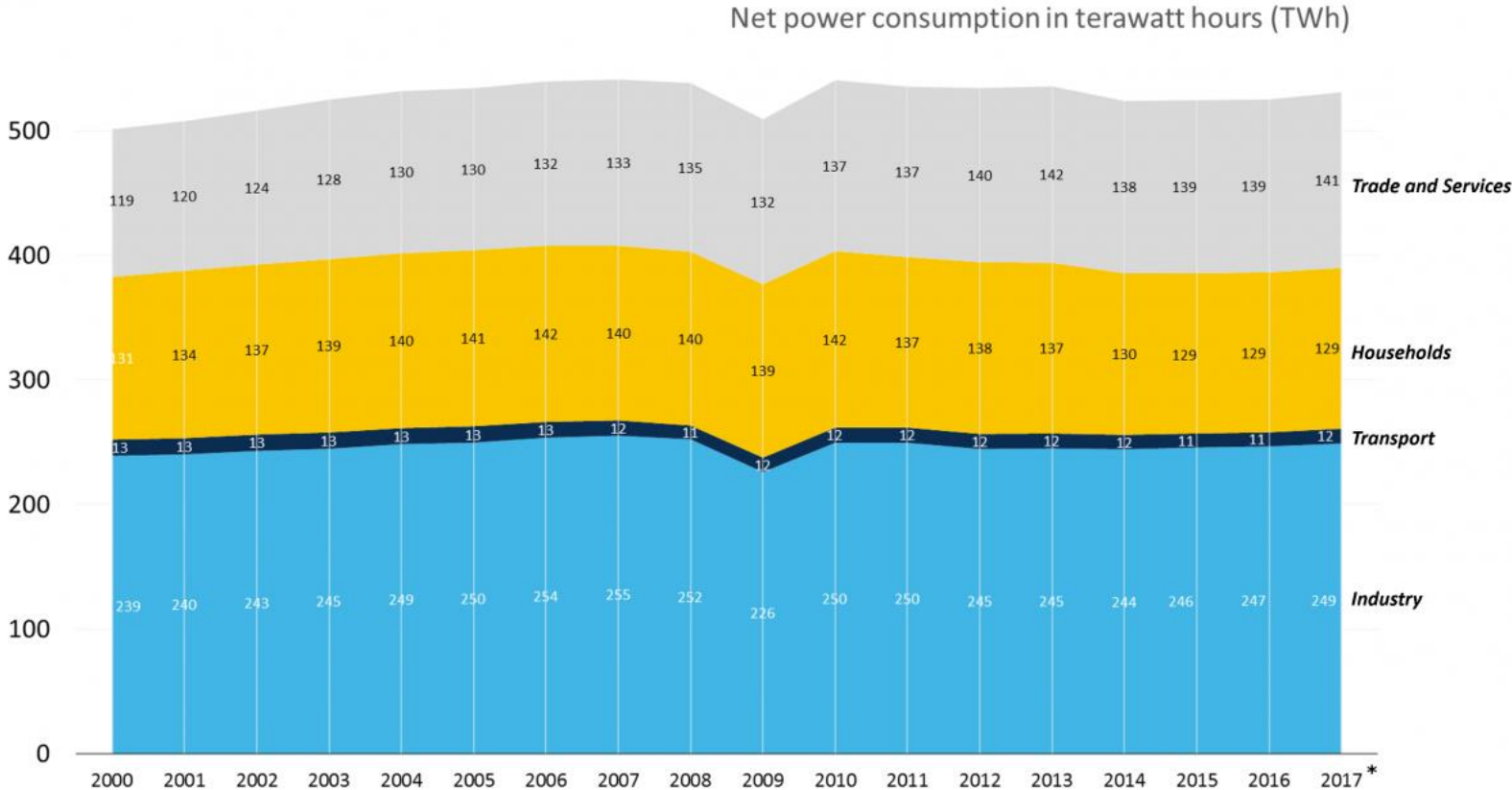
- A-1 1976, 1977
- **TMI-2** **1979**
- **Černobyl** **1986**
- **Fukušima** **2011**
- Tokaimura
- Windscale
- (Kashiwazaki Kariwa)
- (Davis Besse)

**Děkuji za pozornost**

# Co AZE?

## Net power consumption by consumer group 2000 - 2017.

Data: BDEW 2018.



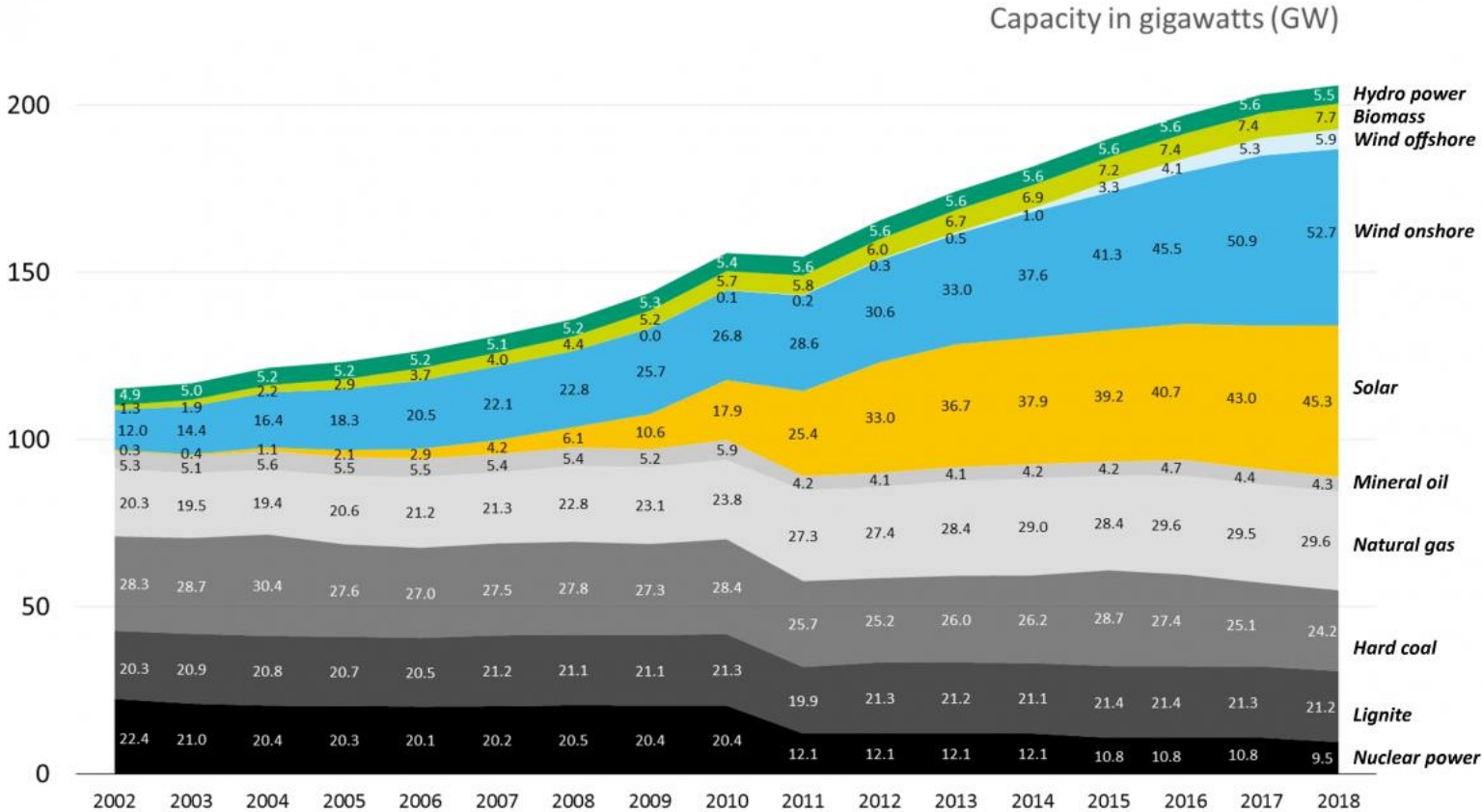
\* 2017: preliminary data



# Co AZE?

## Installed net power generation capacity in Germany 2002 - 2018.

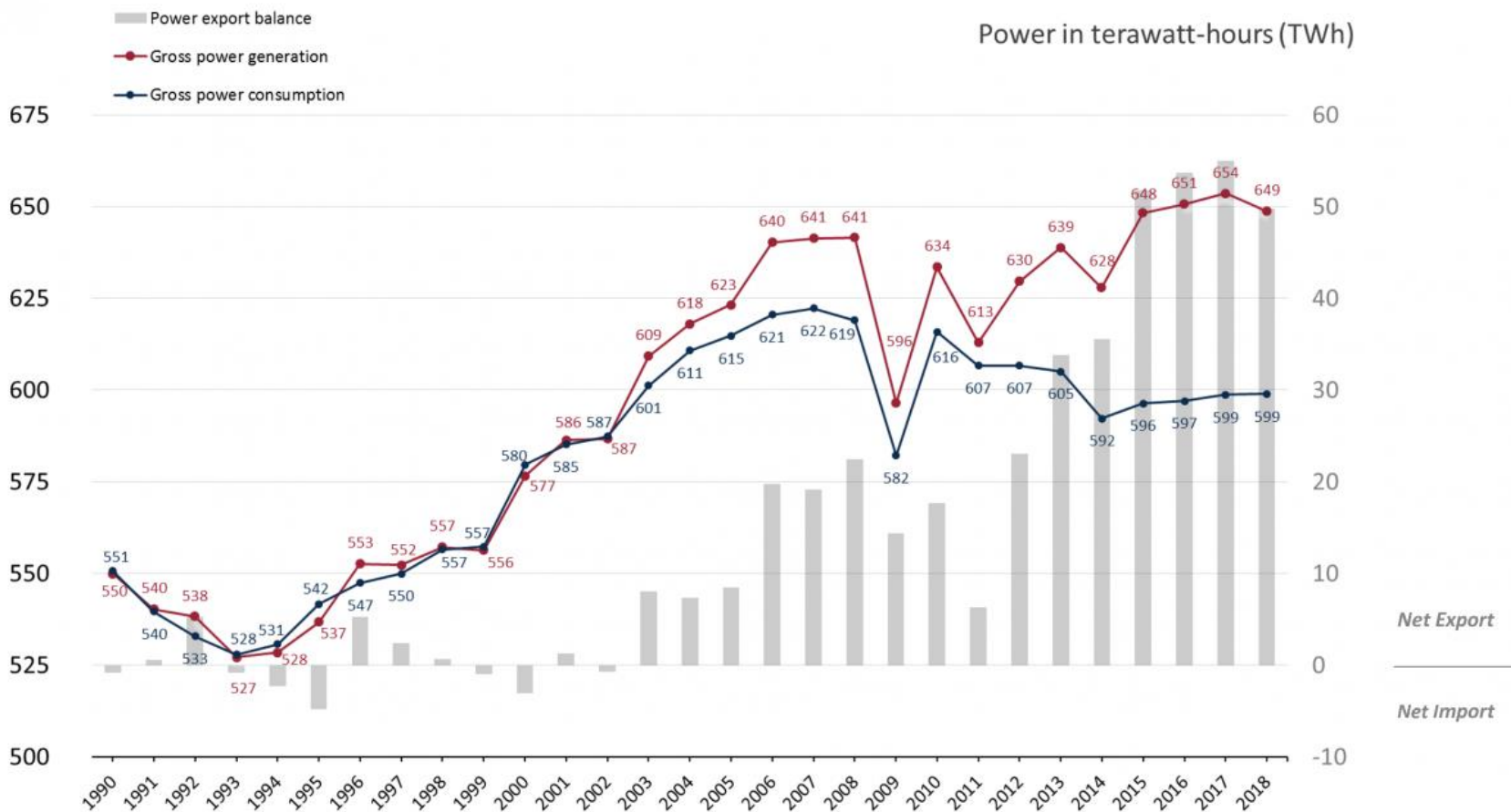
Data: Fraunhofer ISE 2018.



# Co AZE?

## German power export balance 1990 - 2018.

Data: BMWi 2019.



# Německo – výroba 2 týden 2019

