

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**
 - 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.

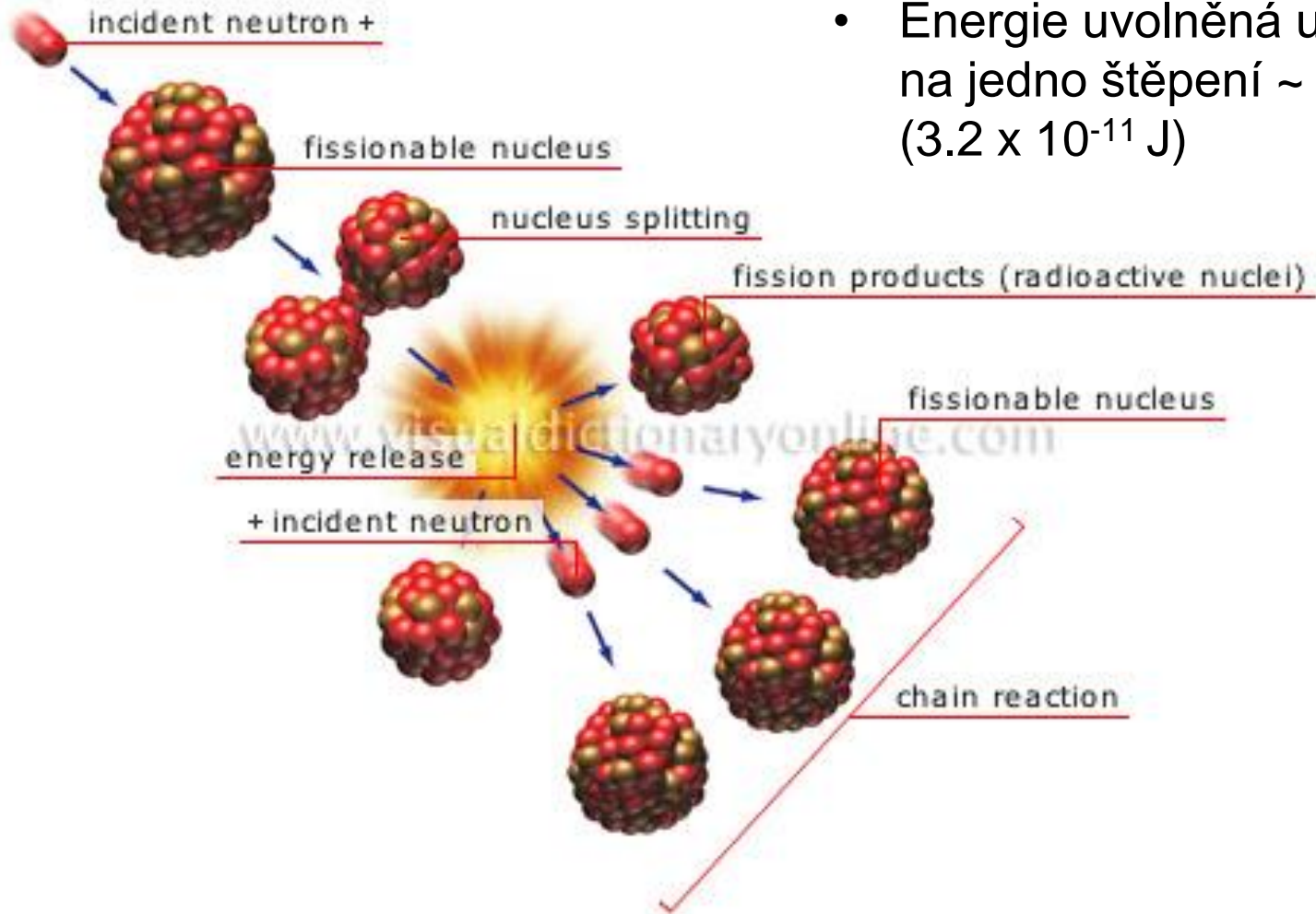
Starohorní reaktor spotřeboval podle odhadu 12 tisíc tun uranu.

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

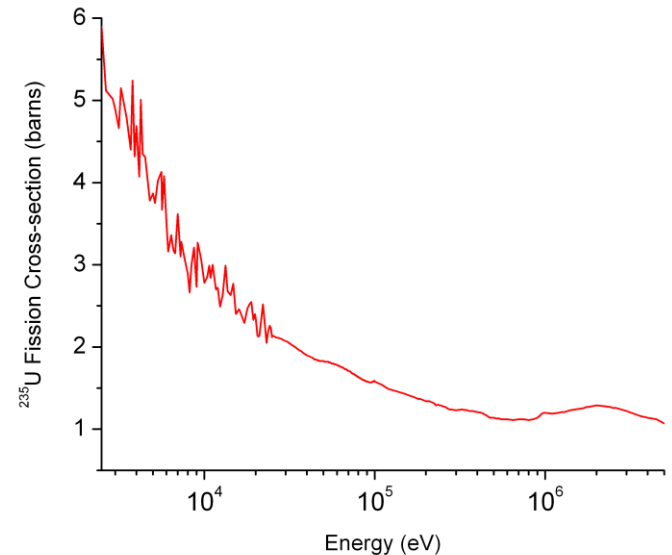
Štěpení



- Energie uvolněná uvolněná na jedno štěpení ~ 200 MeV (3.2×10^{-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

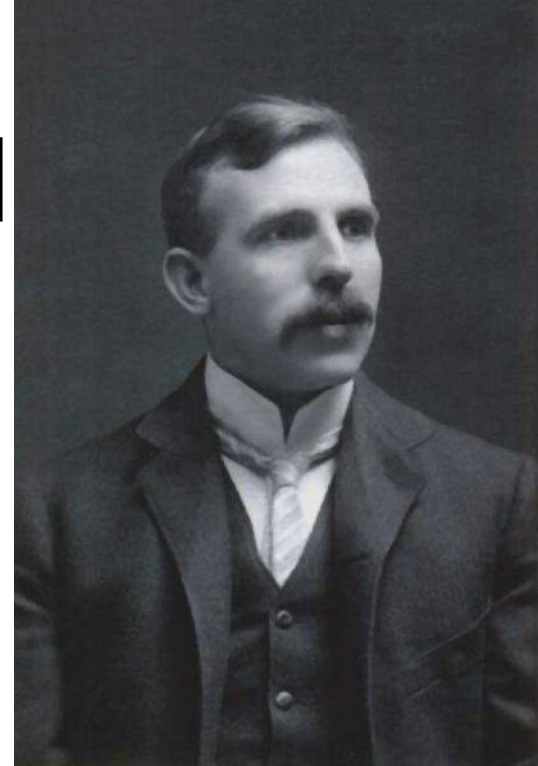
α , β (1899), γ (1903)

Objev jádra atomu (1909)

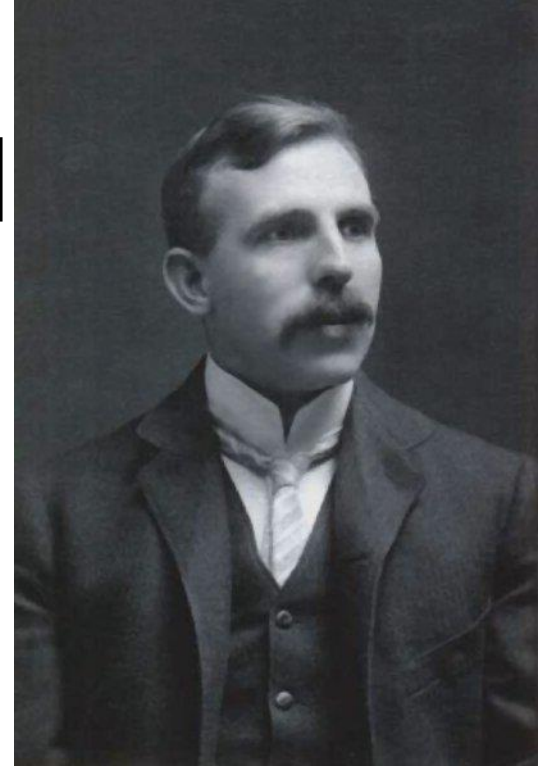
Objev protonu (1918)

Předpověděl existenci neutronu (1921)

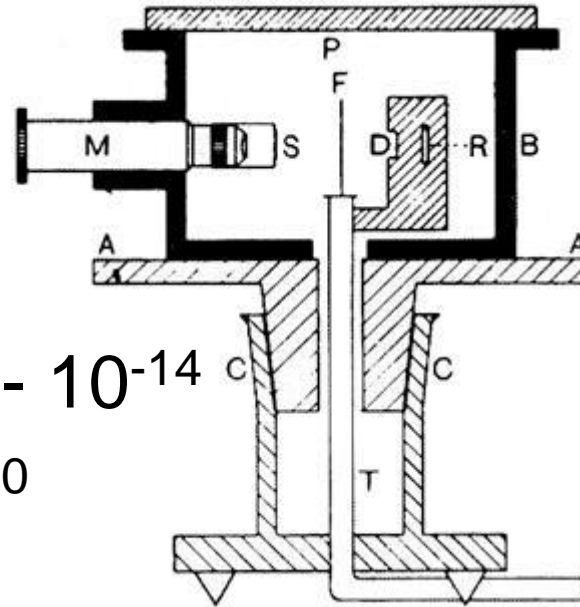
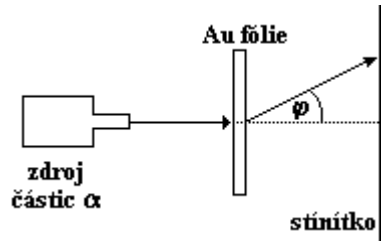
Experimentálně potvrzeno Jamesem Chadwickem
(1932)



Ernst Rutherford



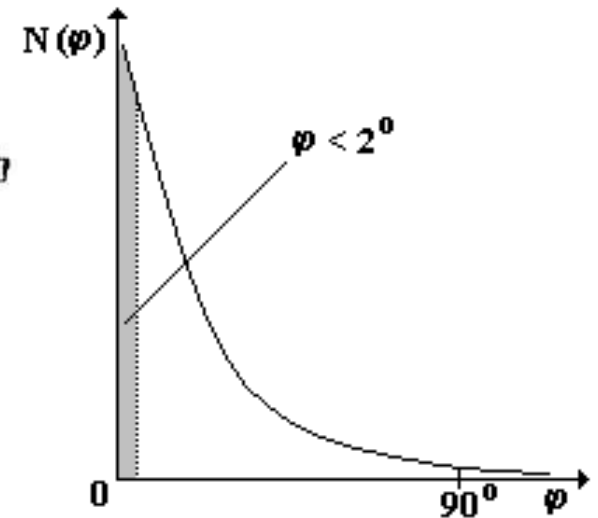
Vyvrácení Thomsonova modelu atomu



Rozměr jádra $10^{-15} - 10^{-14}$

Rozměr atomu 10^{-10}

Atom je v podstatě prázdný prostor



Niels Bohr

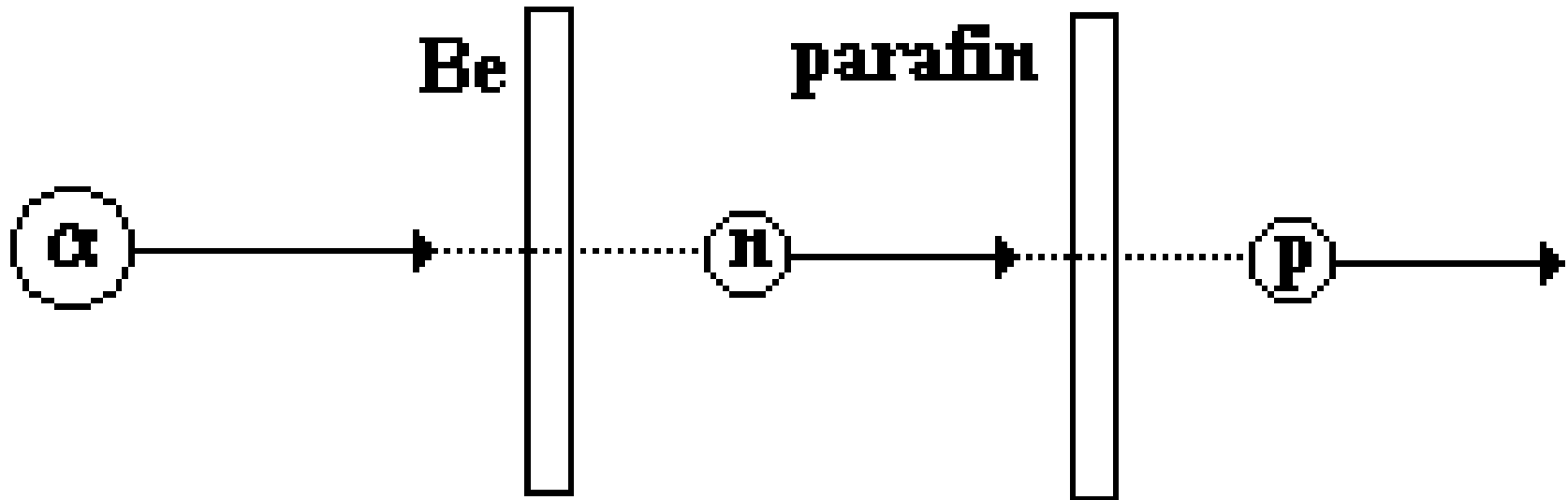
Dopracoval Rutherfordův model atomu.
Založil kvantovou mechaniku
ve spolupráci s Heisenbergem
a Schrödingerem.



James Chadwick

- 1891 – 1974
- Objev neutronu – 1932
- Pomocí α 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.

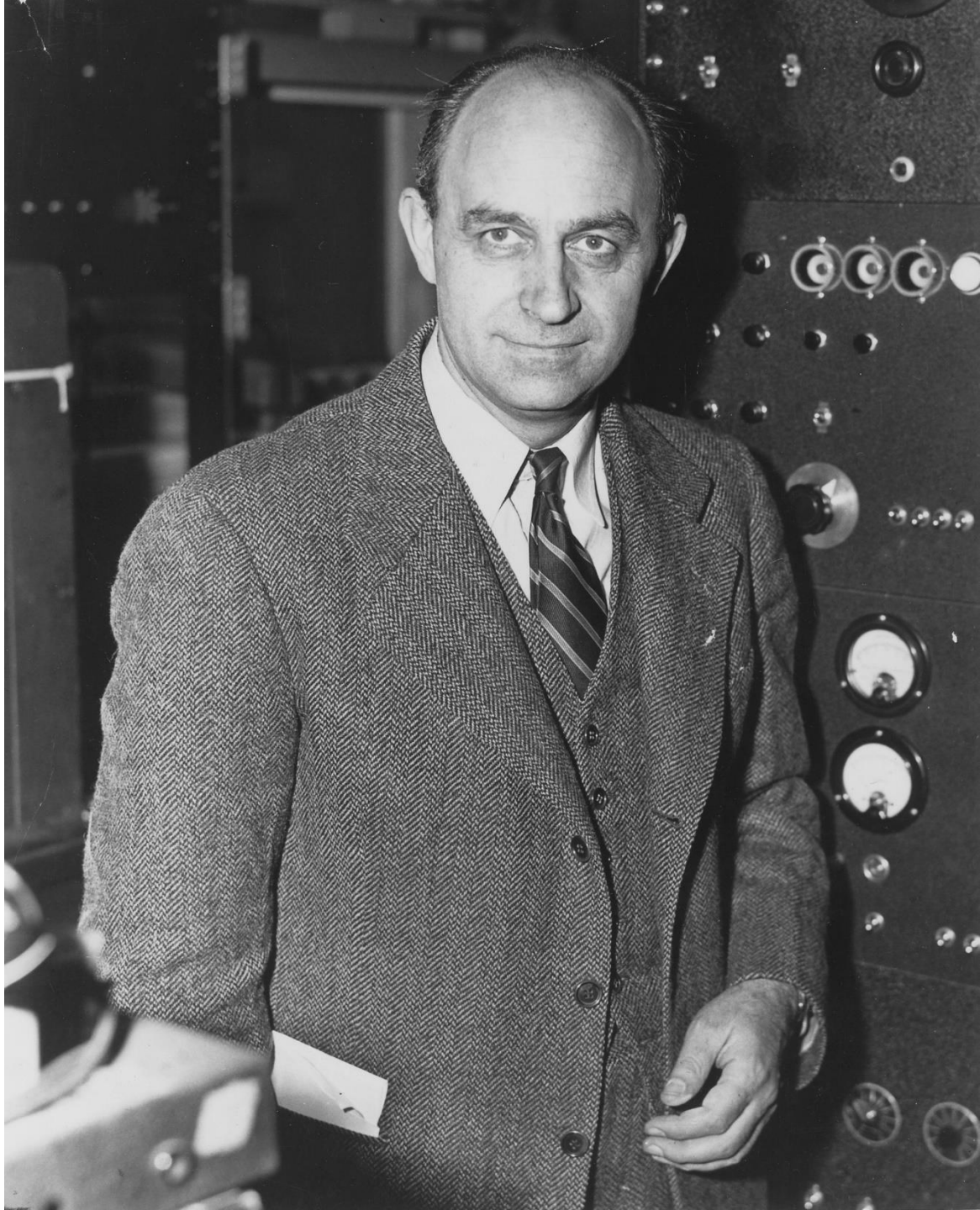
Objev štěpení – Otto Hahn a Lisa Meitner

- 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 pohlíželi na barium jako na údajný transuranický 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

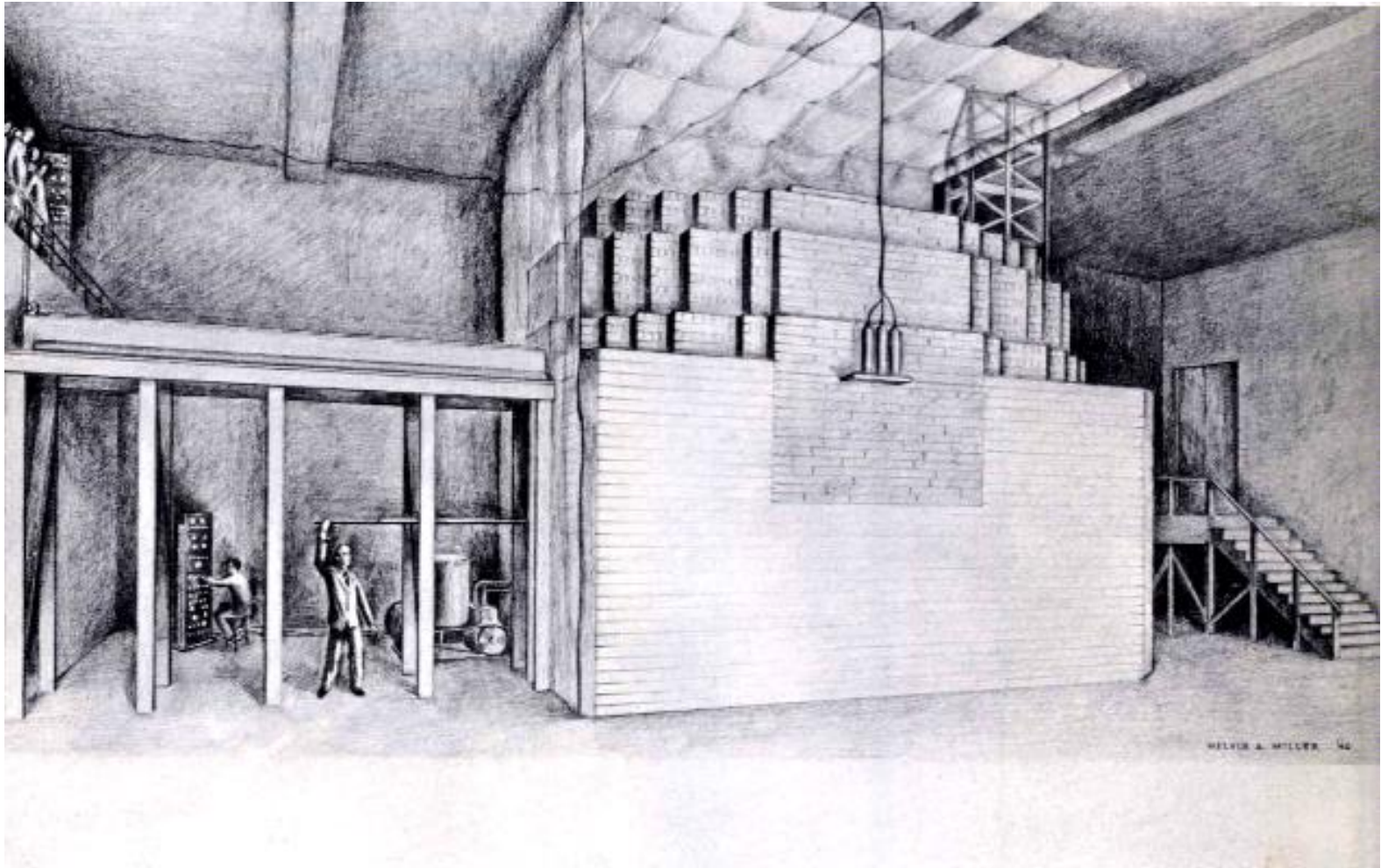


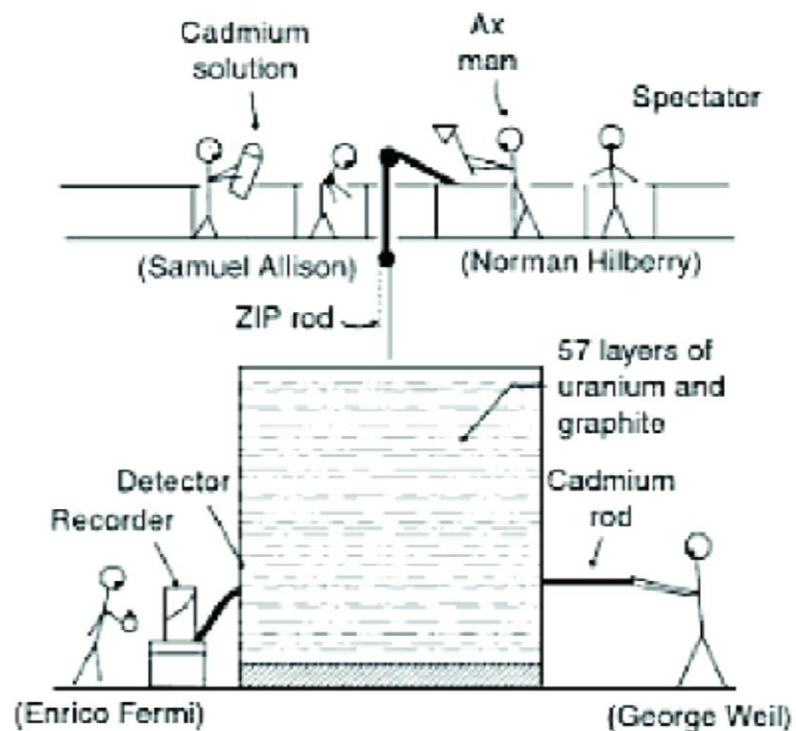
Enrico Fermi

1901 – 1954

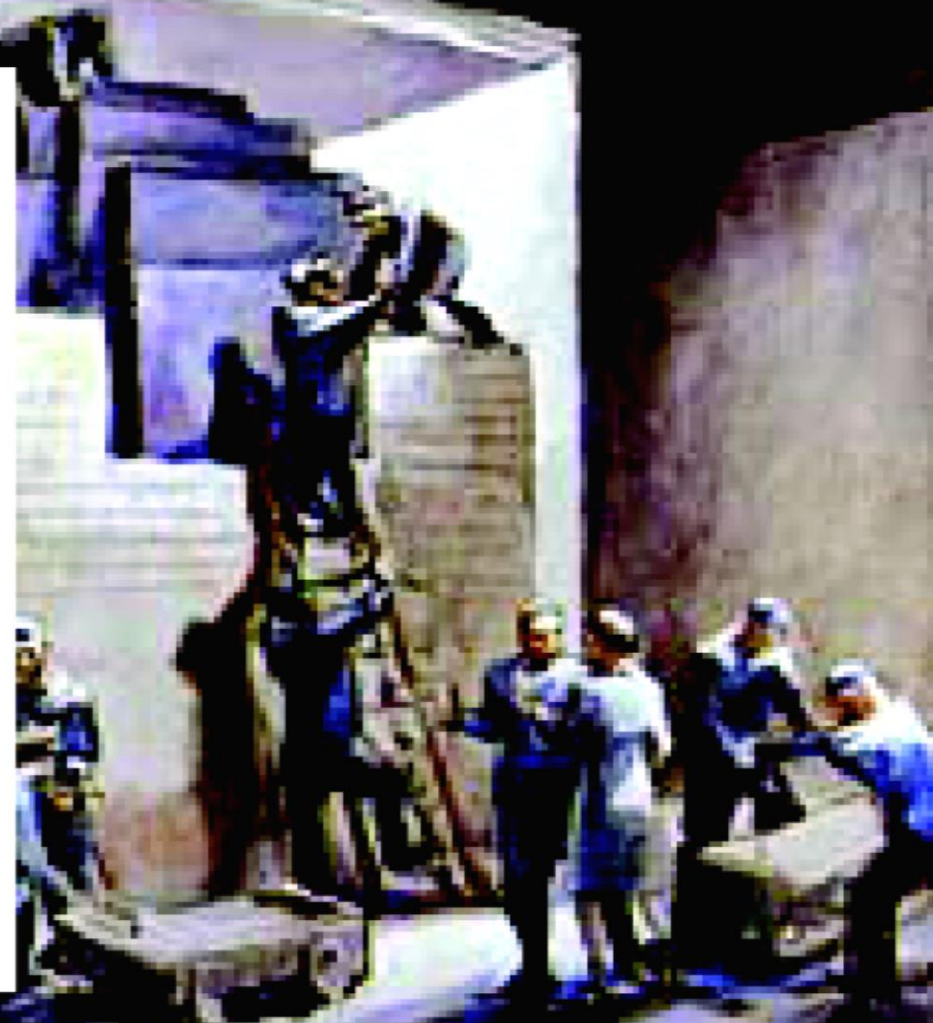


1. jaderný reaktor Chicago – 2. 12. 1942



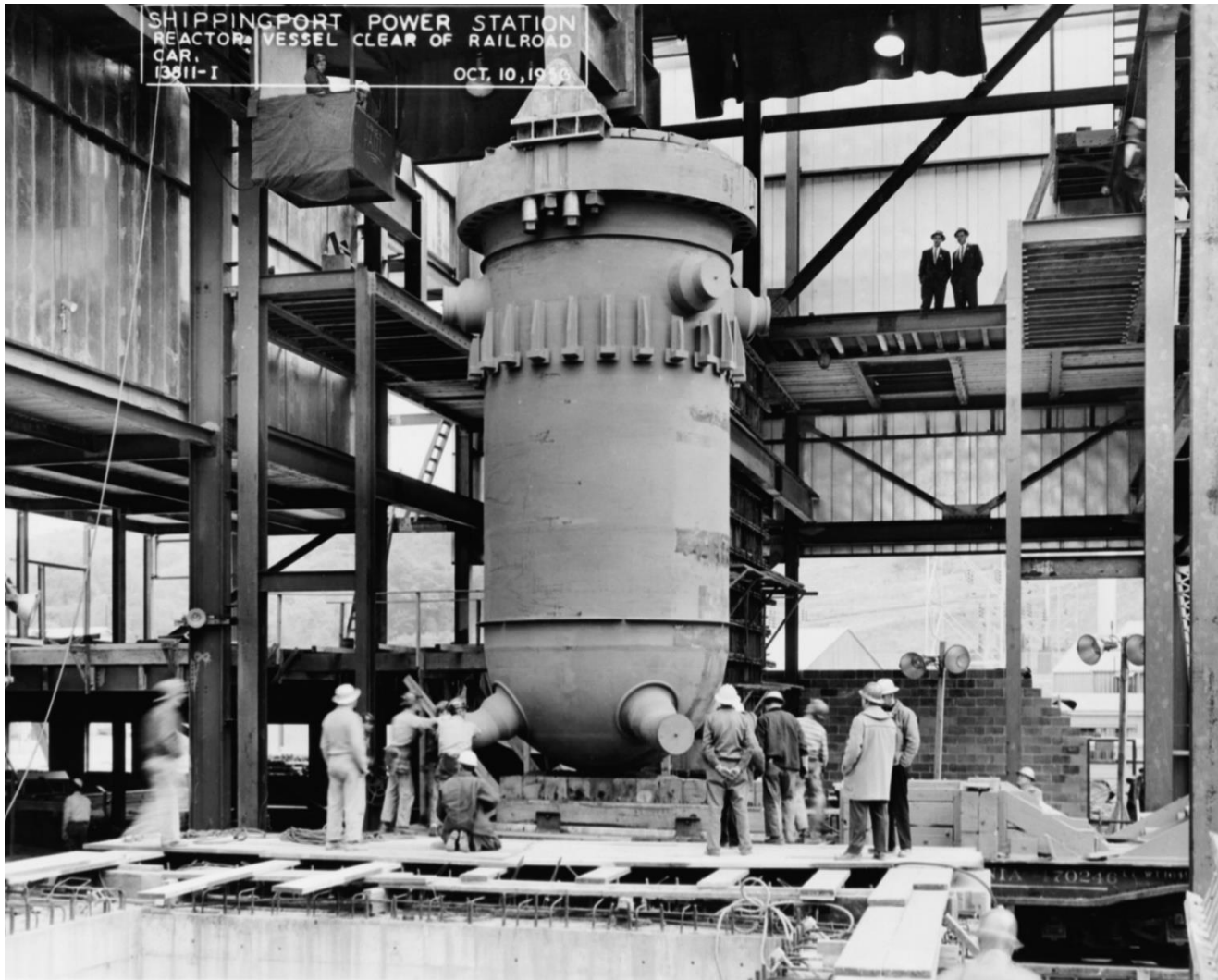


THE FIRST REACTOR
2, December 1942



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

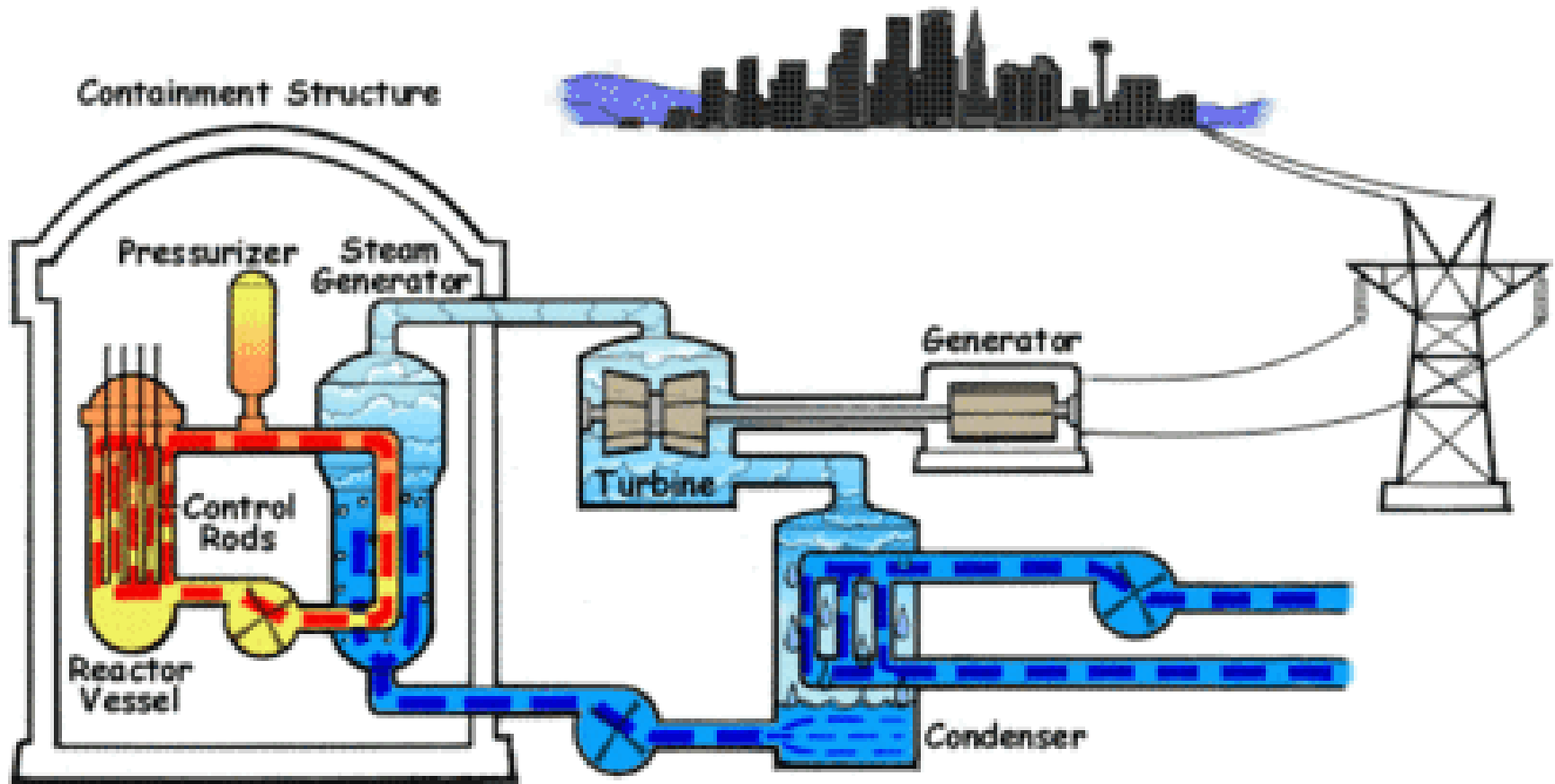
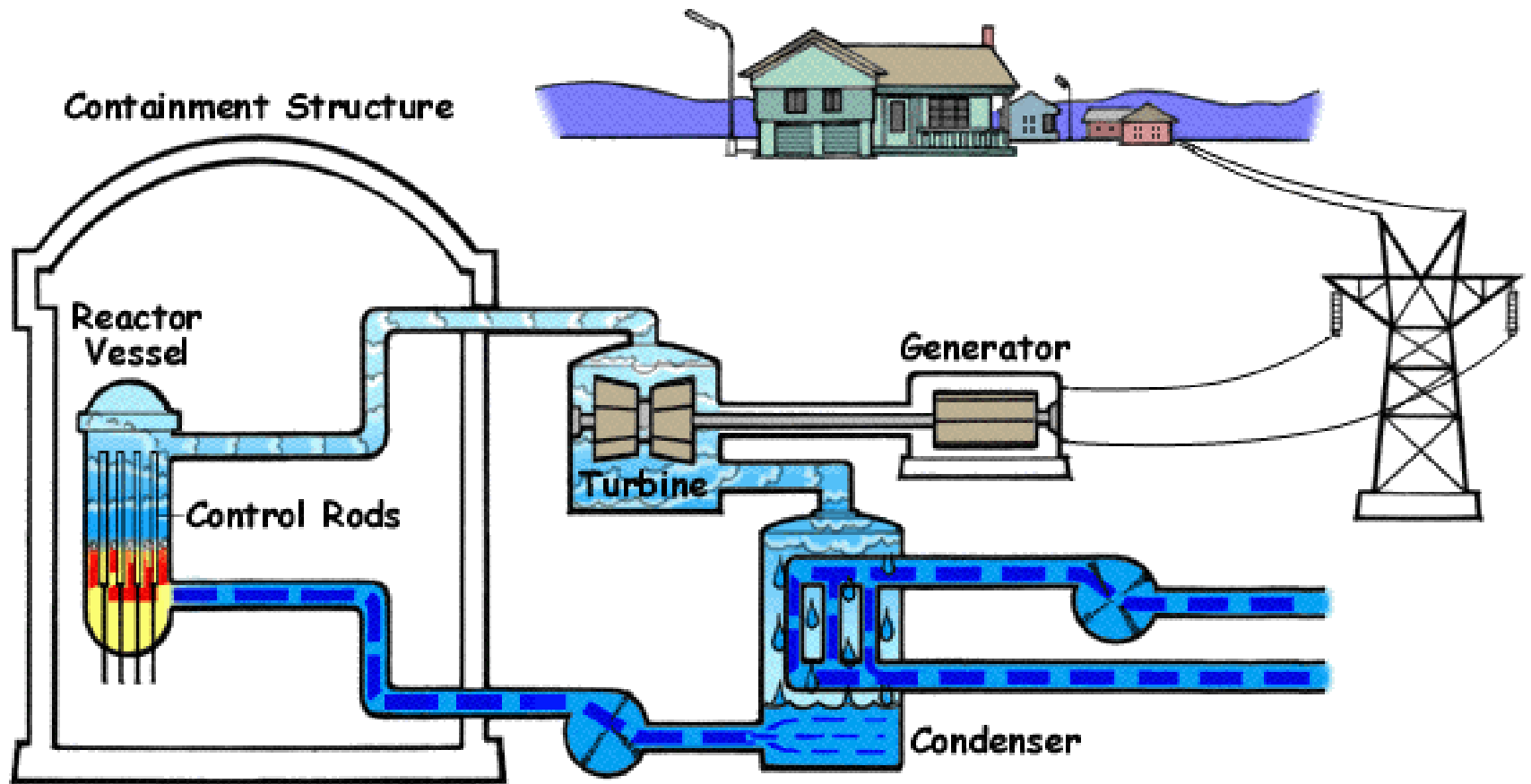
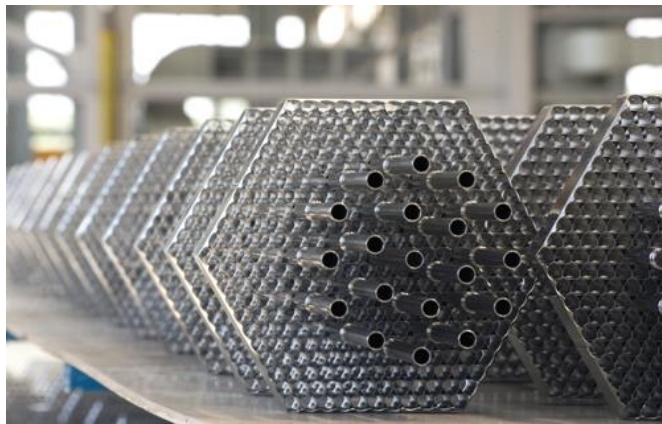
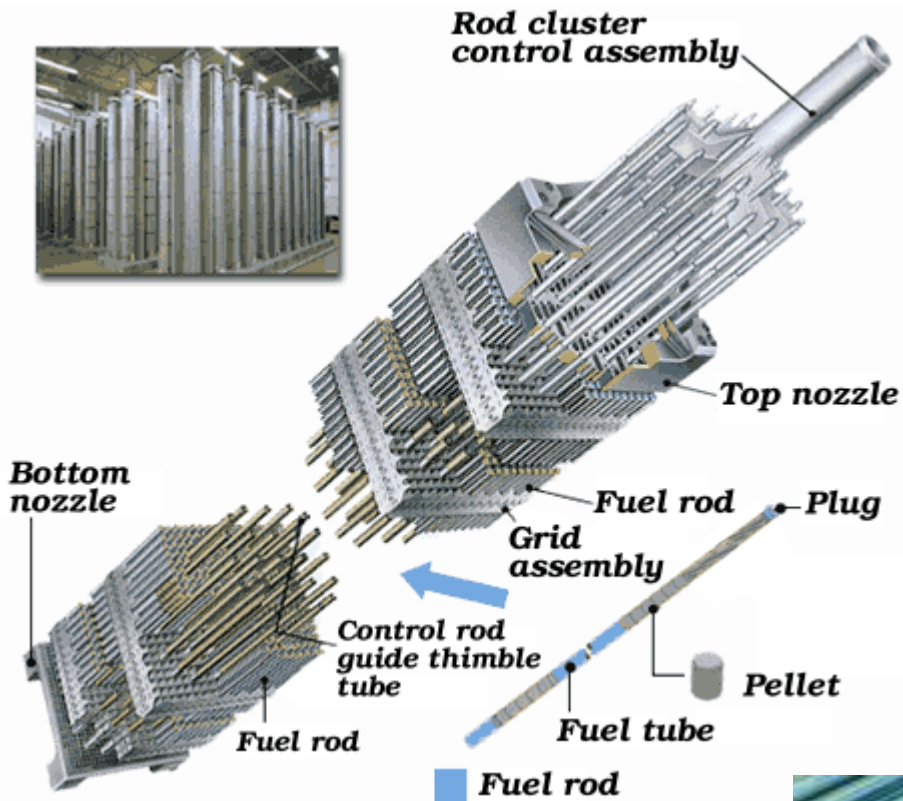


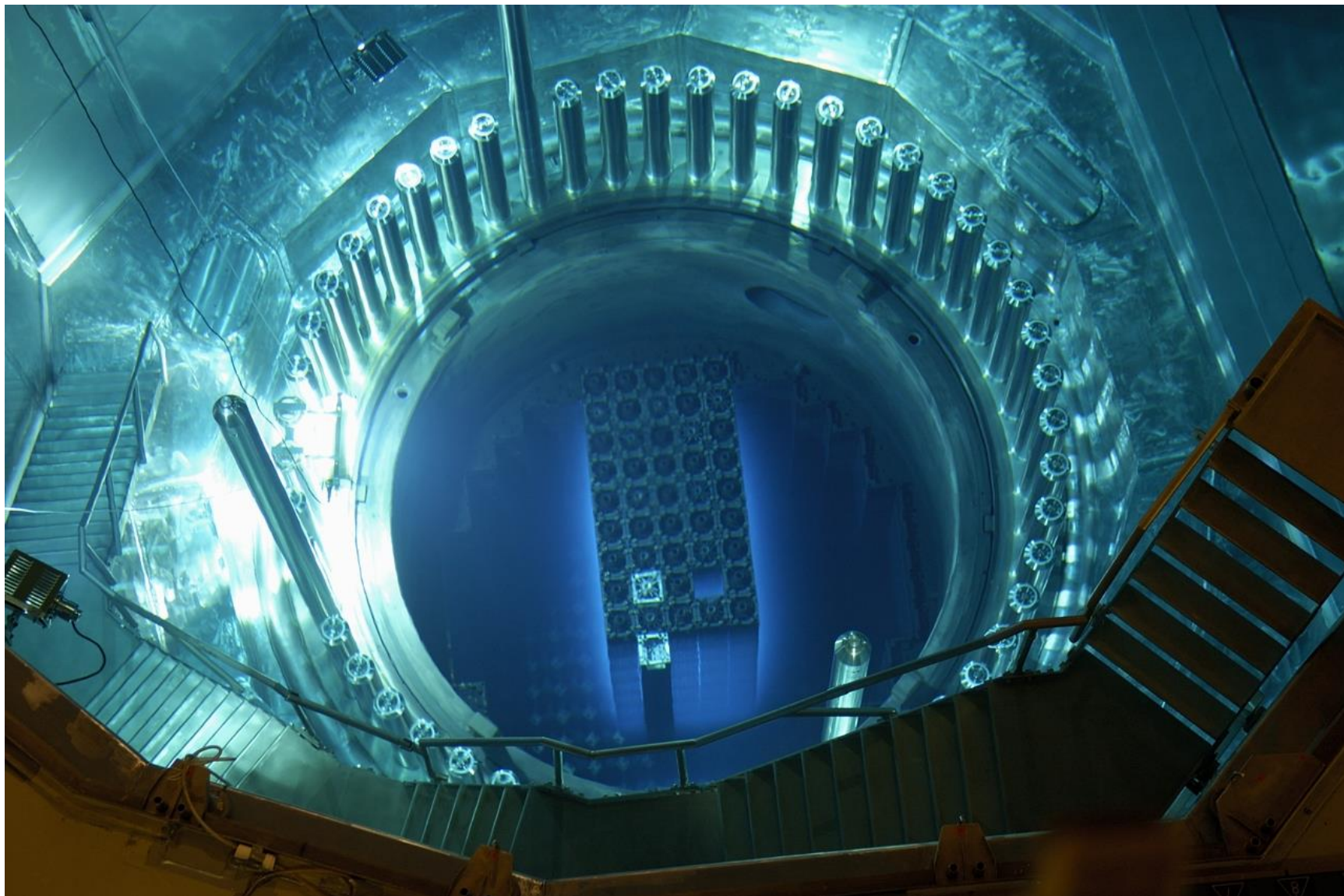
Schéma varného reaktoru



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



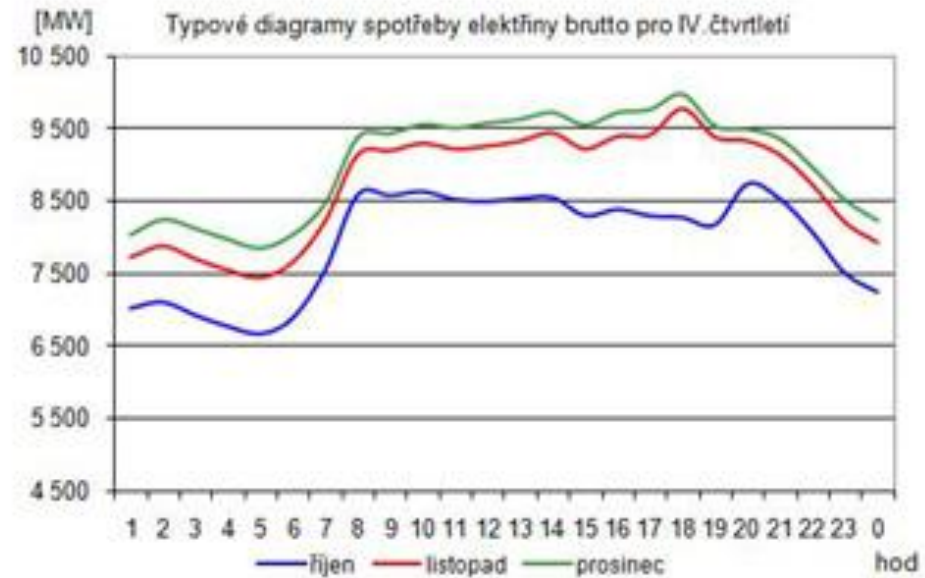
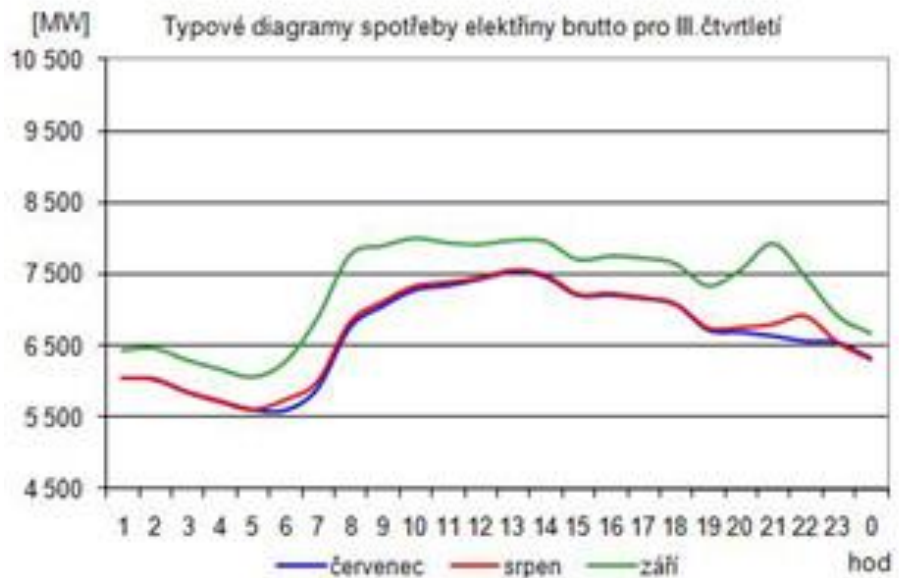
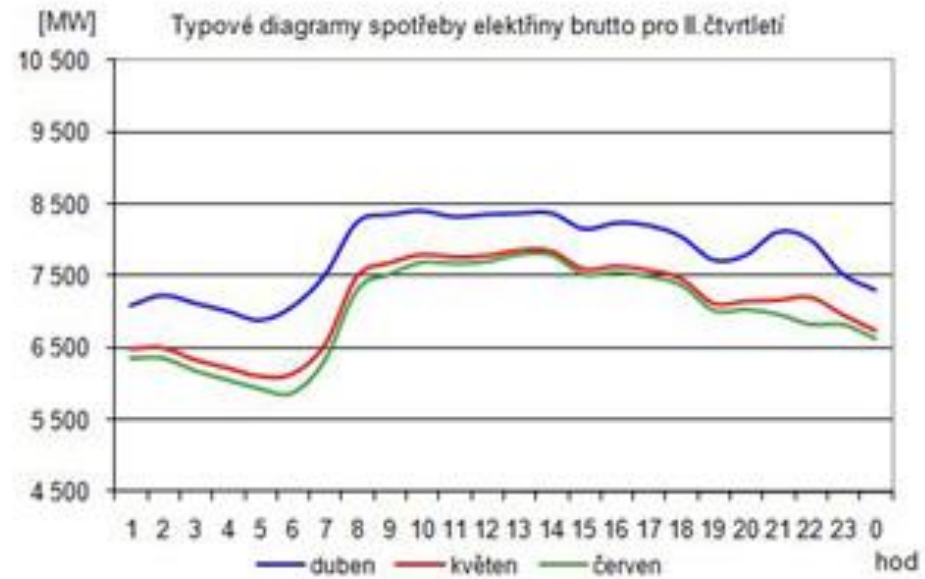
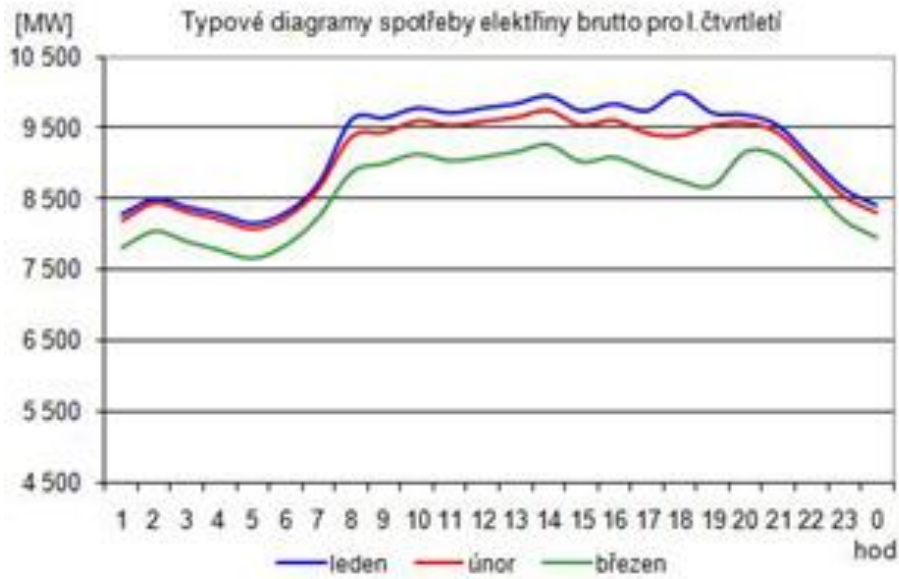
- Nikdy neletěl na jaderný pohon

JE dnes

- 435 NUCLEAR POWER REACTORS
IN OPERATION
- 370 066 MWe TOTAL NET INSTALLED
CAPACITY
- 64 NUCLEAR POWER REACTORS
UNDER CONSTRUCTION

Denní diagram

Typové diagramy spotřeby elektriny brutto pro jednotlivé měsíce roku



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

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
 - 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

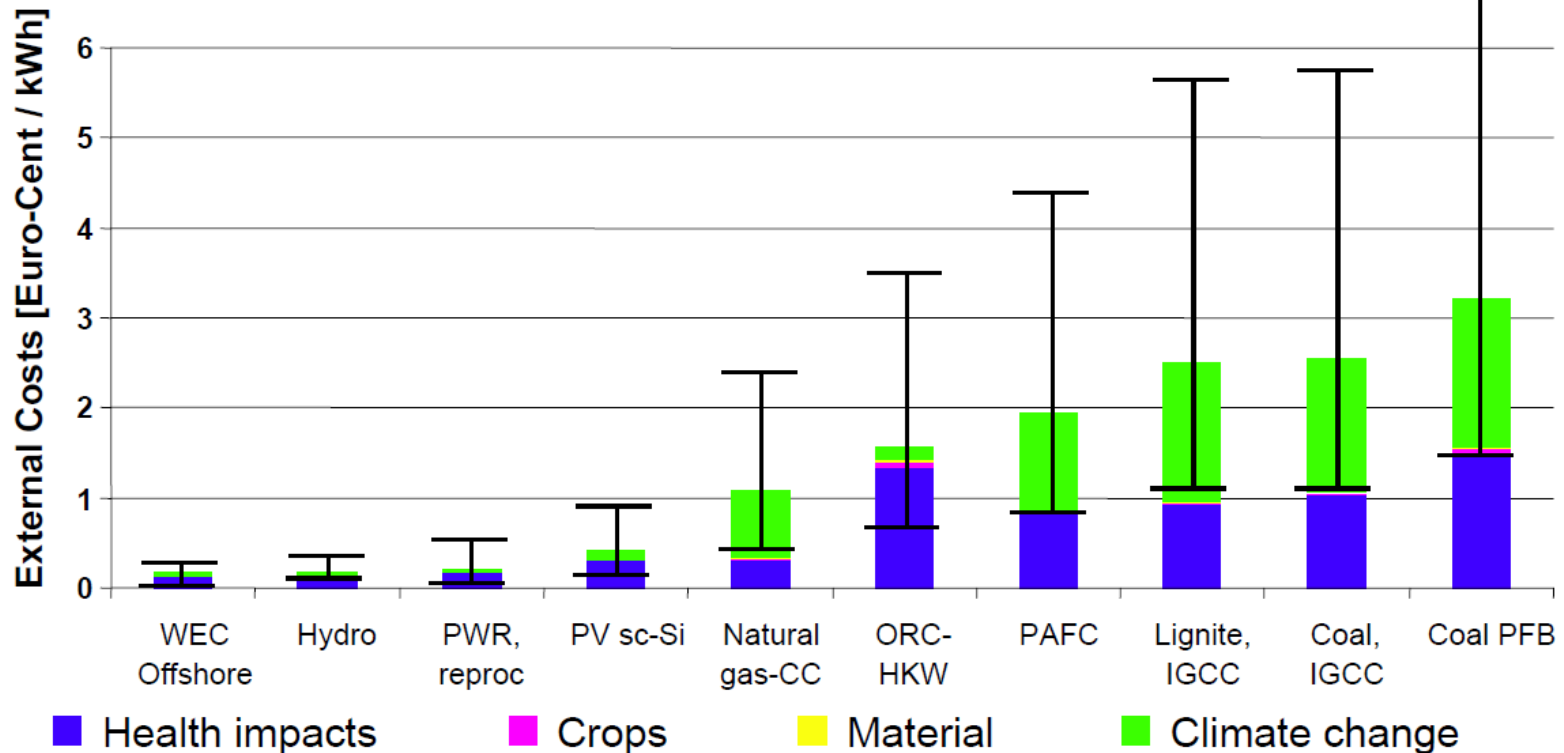
Externí náklady jednotlivých zdrojů

IER

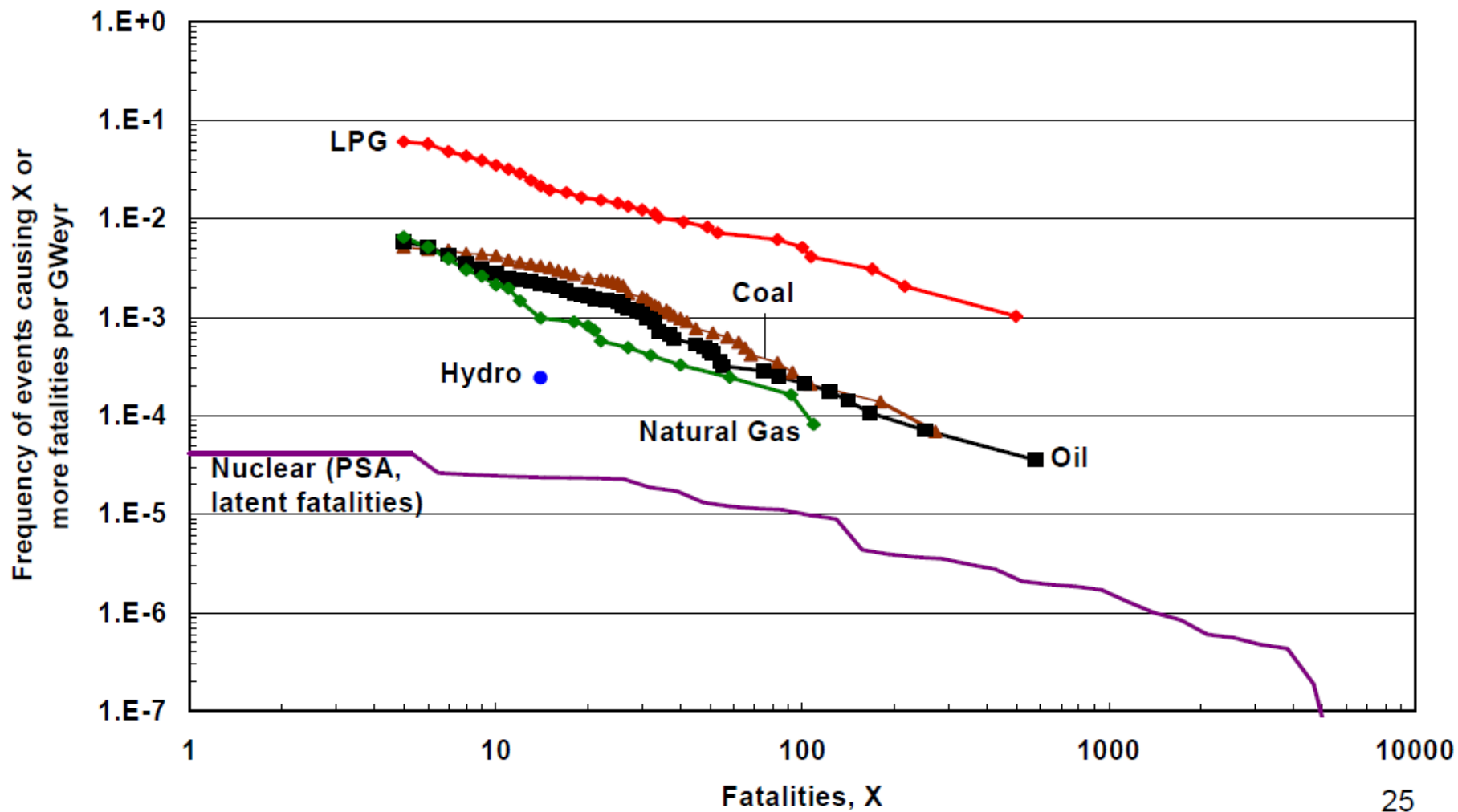
Externe

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

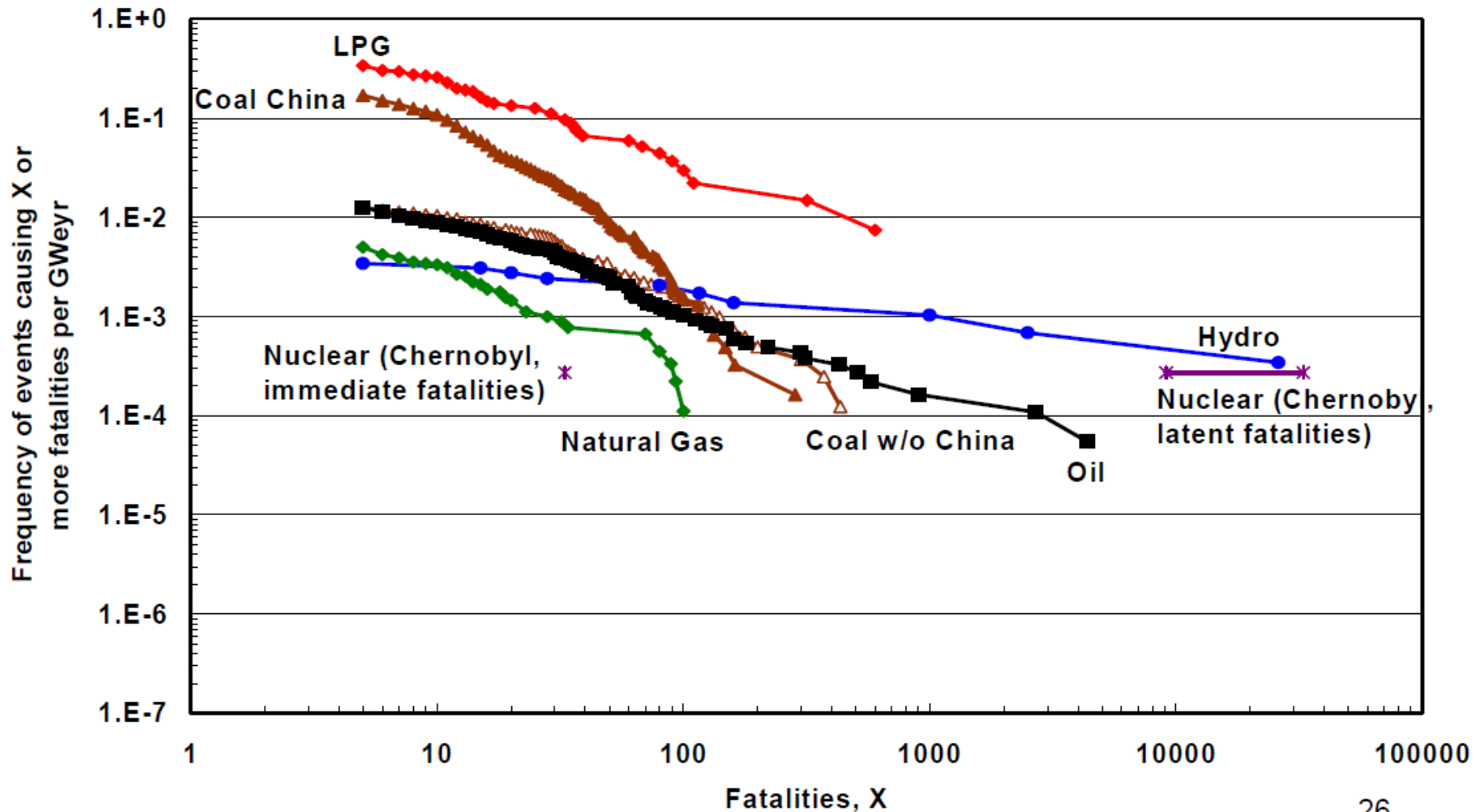
19 Euro/t CO₂, Nitrates = 0.5 PM₁₀, YOLL_{chronic} = 50.000 Euro



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



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



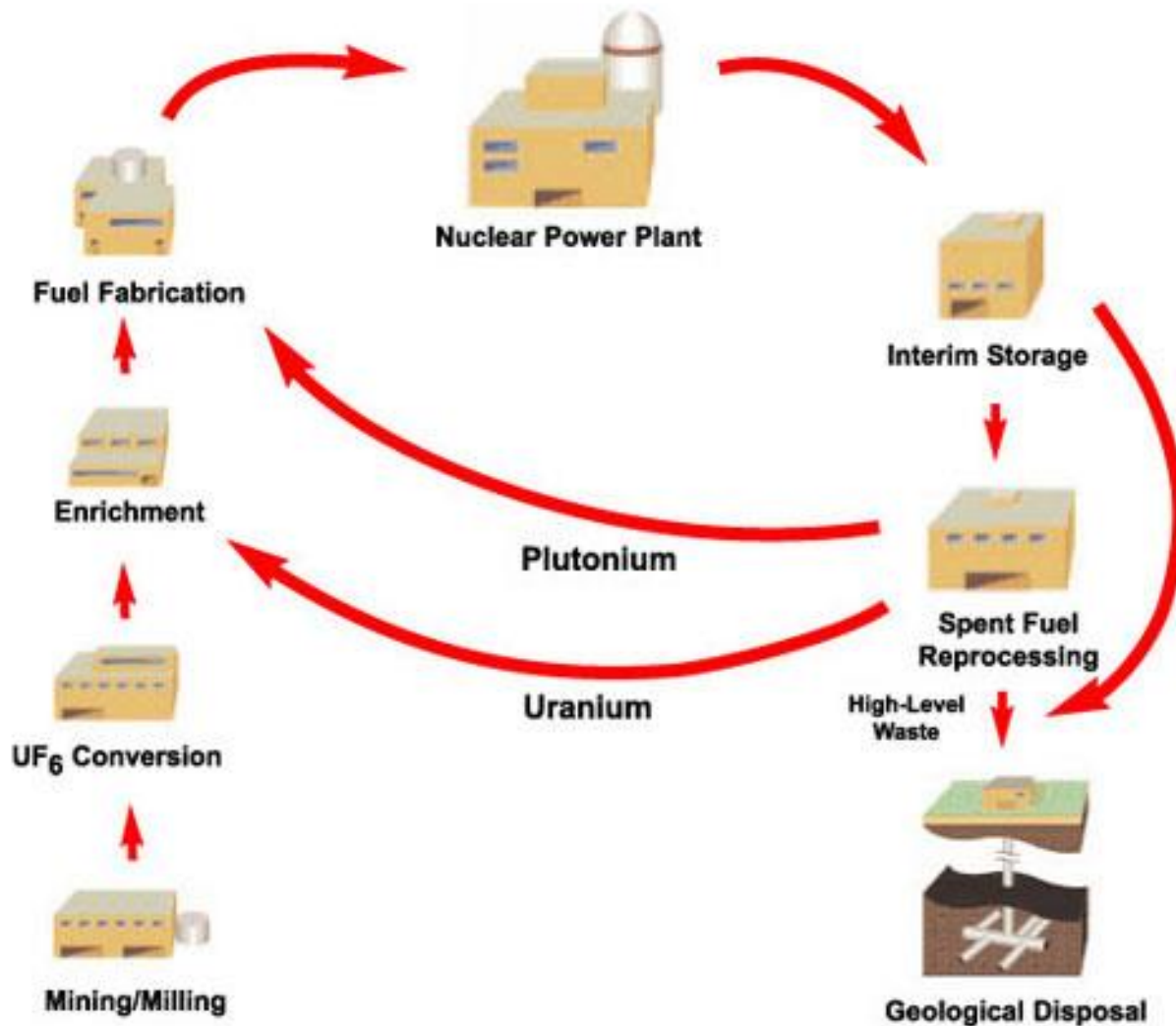
Počet mrtvých na 1TWh

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)

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**.

Způsoby uložení 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

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}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 (zatavují 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 úplně bezpečný 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

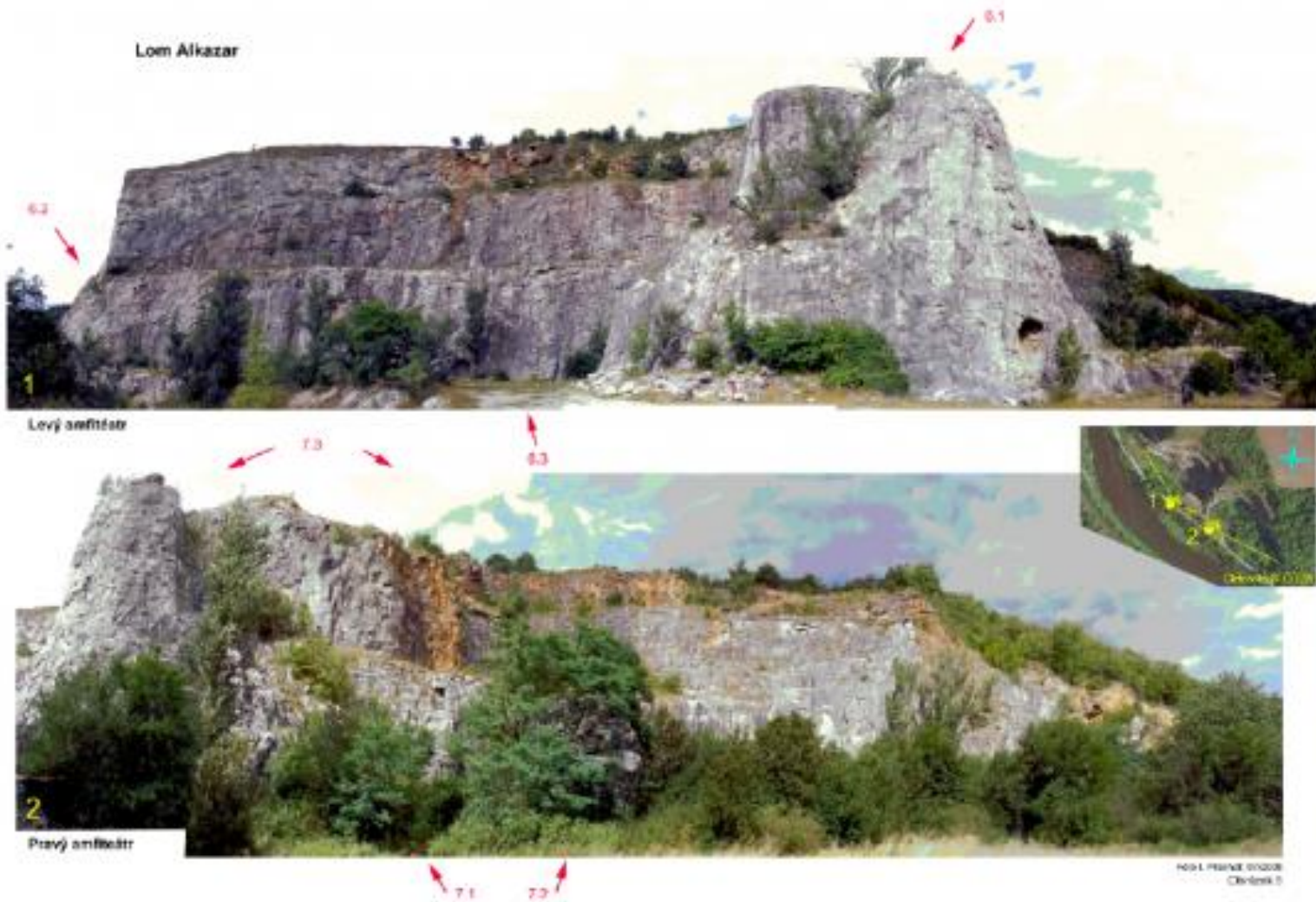
- Nízkoaktivní a středněaktivní radioaktivní odpad z JE Dukovany a JE Temelín jsou předávány k uložení ve zpevněné formě nebo ve schválených obalech.
- Technologie bitumenace, použitá na úpravu kapalných radioaktivních odpadů v obou jaderných elektrárnách, zaručuje dlouhodobou stabilní ochranu proti 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.

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.

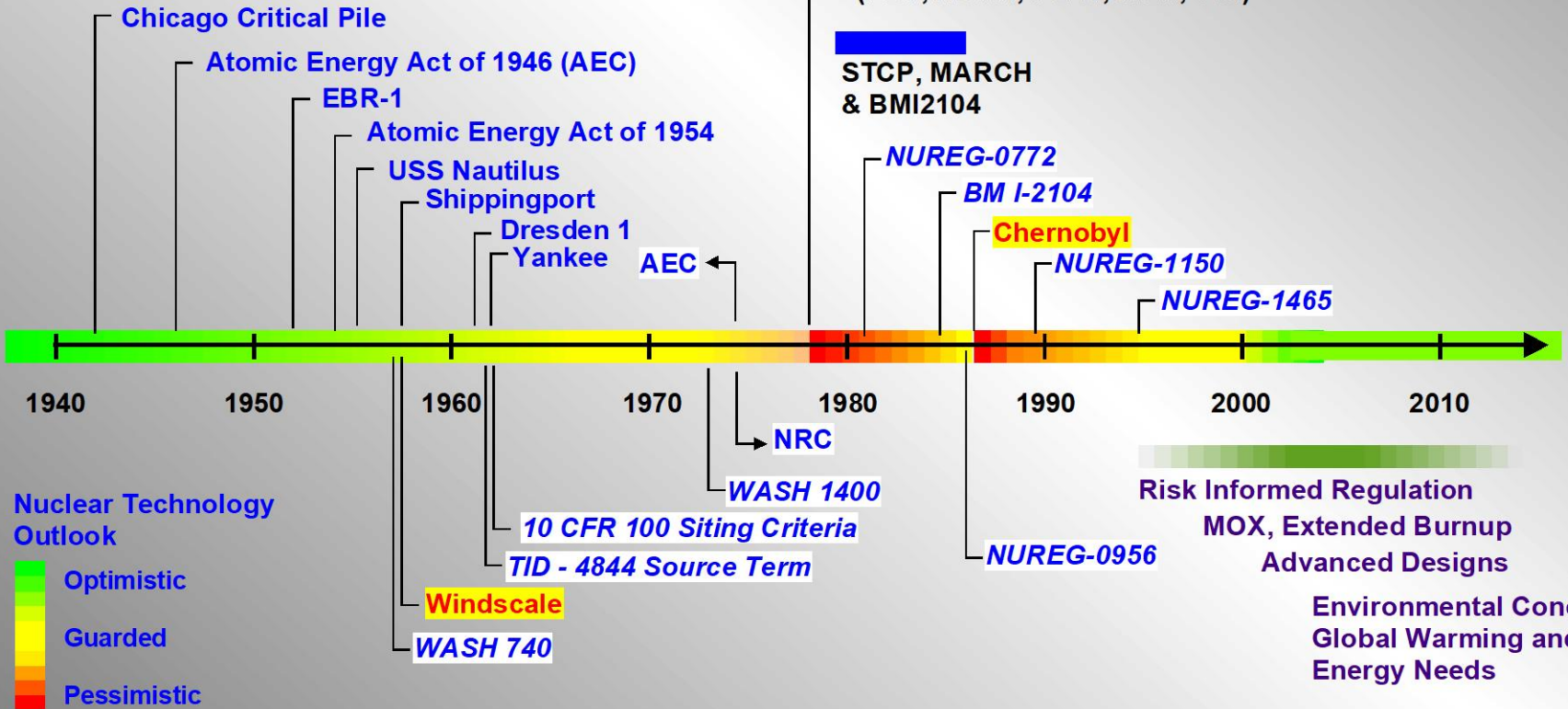
Obsah

- 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**
 - 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.

Timeline of Nuclear Safety Technology Evolution



TMI-2

Tier 1: MELCOR Integrated Code

Consolidated Codes

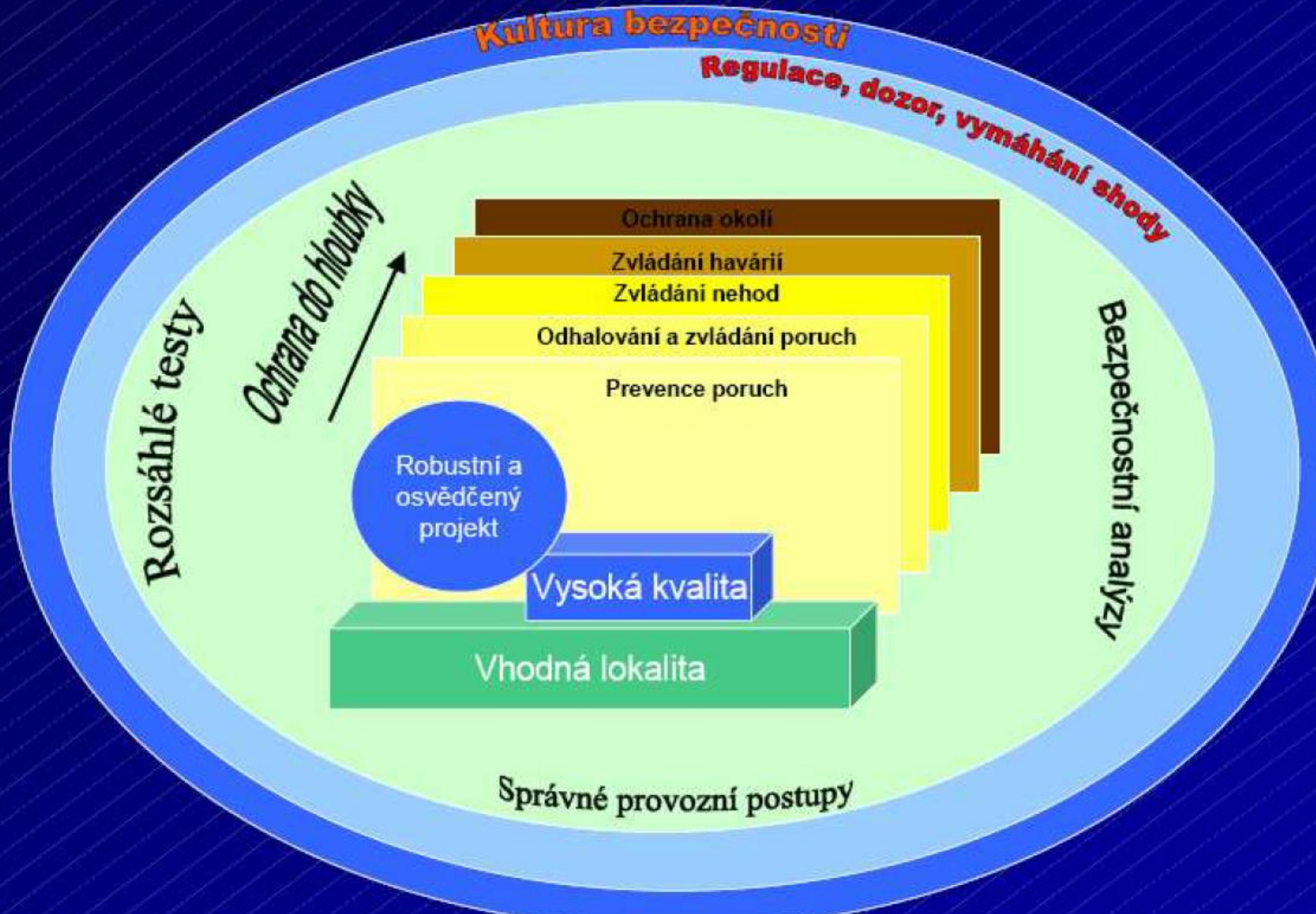
Tier 2: Mechanistic Codes
SCDAP, CONTAIN, VICTORIA

Phenomenological Experiments
(PBF, ACRR, FLHT, HI/VI, etc.)

STCP, MARCH & BMI2104

Ochrana do hloubky

- Bariéry
 - Organizační, fyzické
- Redundance
- Diverzifikace



Kultura bezpečnosti

Regulace, dozor, vymáhání shody

Rozsáhlé testy

Ochrana do hloubky

Bezpečnostní analýzy

Správné provozní postupy

Ochrana okolí

Zvládnutí havárií

Zvládnutí nehod

Odhalování a zvládnutí poruch

Prevence poruch

Robustní a osvědčený projekt

Vysoká kvalita

Vhodná lokalita

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

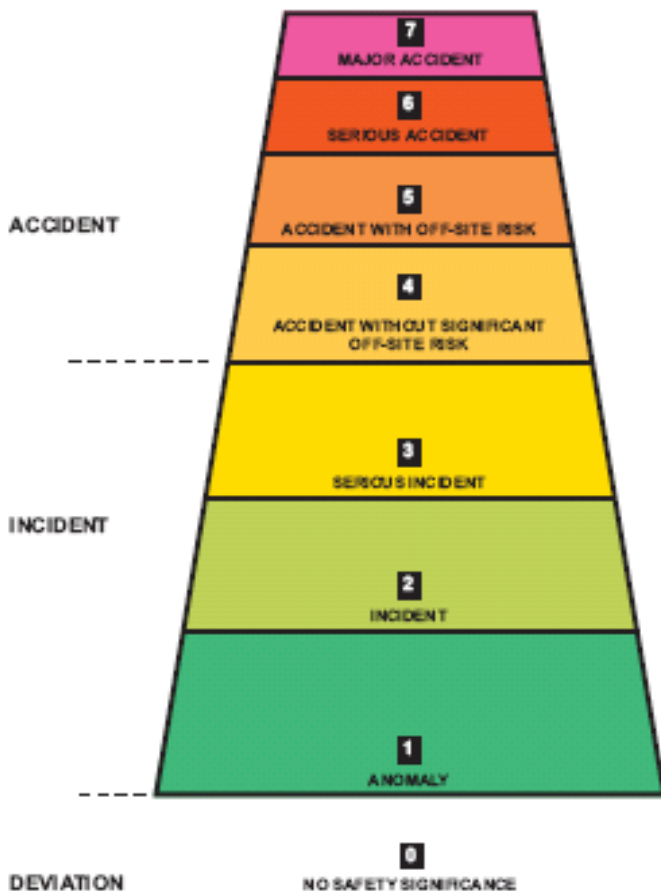
Mezinárodní stupnice INES

- 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

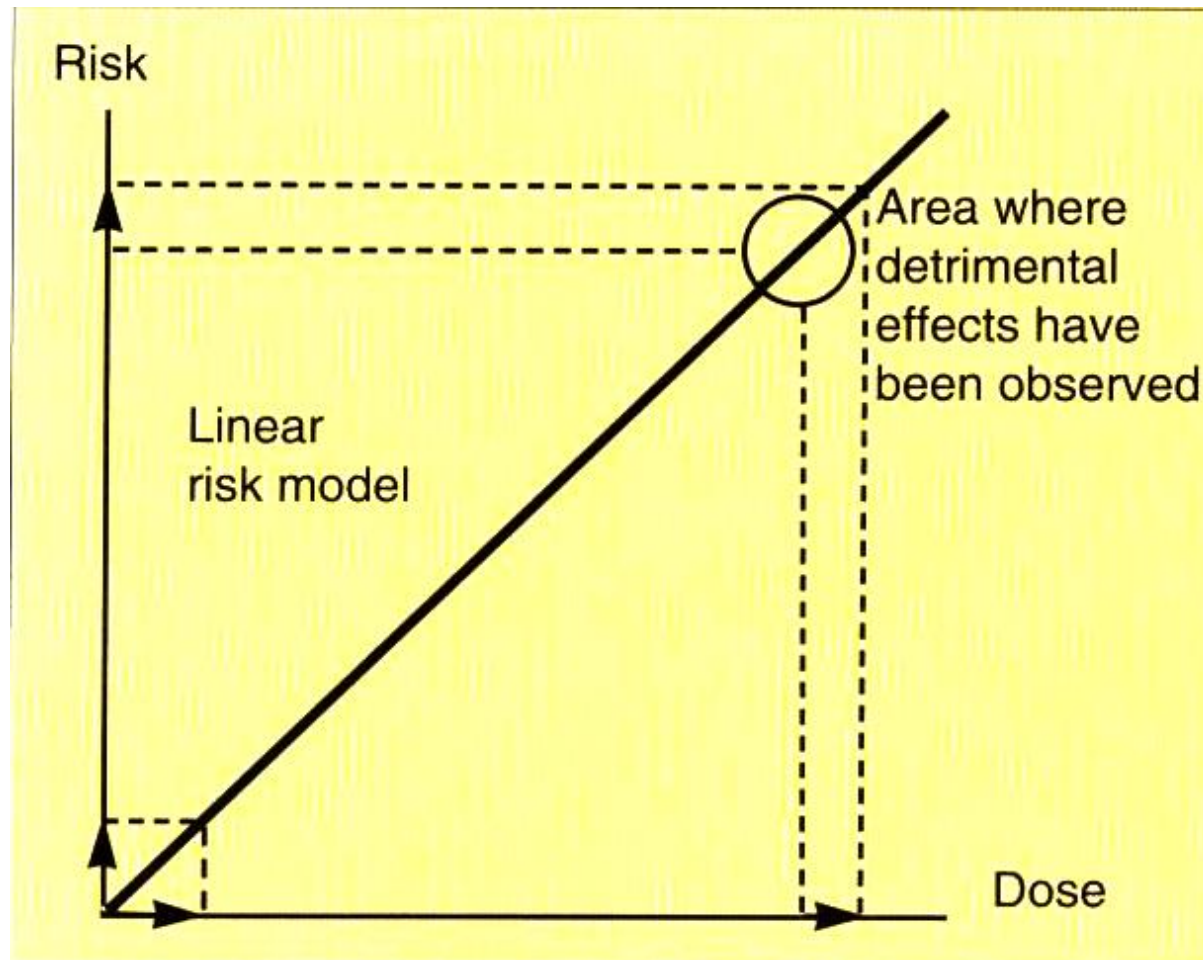
For prompt communication of safety significance



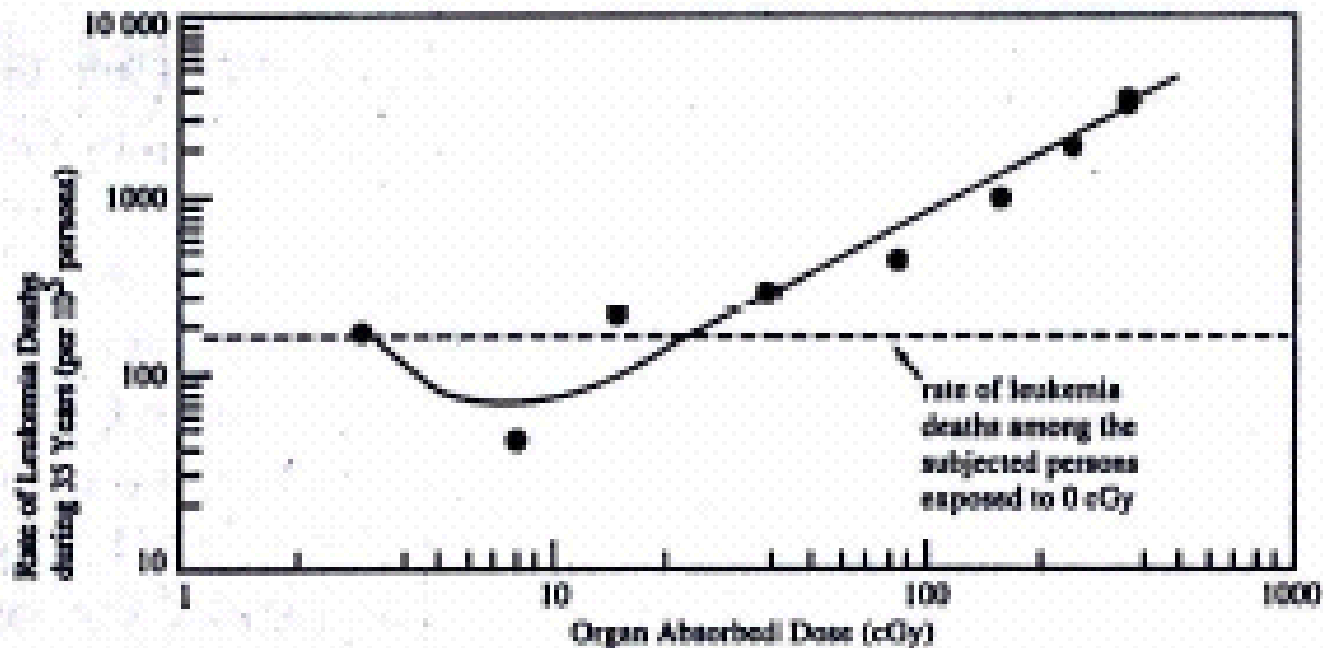
	KRITÉRIA NEBO BEZPEČNOSTNÍ ATRIBUTY		
	Důsledky mimo hranici jaderného zařízení	Důsledky uvnitř hranice jaderného zařízení	Narušení hloubkové ochrany
7 VELMI TĚŽKÁ HAVÁRIE	značné uvolnění radioaktivních látek, velké účinky na zdraví a životní prostředí		
6 TĚŽKÁ HAVÁRIE	významné uvolnění radioaktivních 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		

Princip ALARA

Linear risk model



Pozitivní vliv malých dávek ? (radiační hormeze)



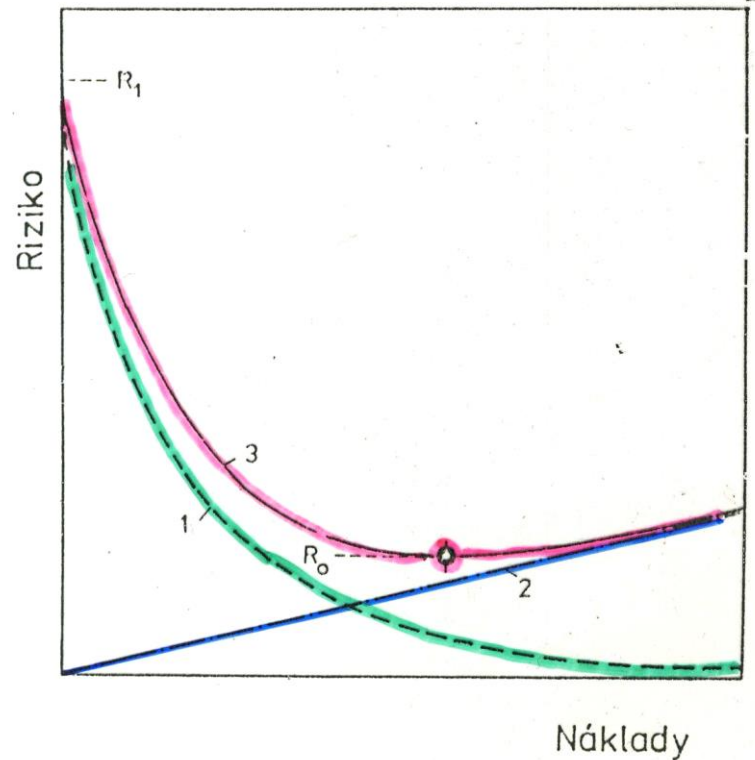
Obr. 1 Úmrtnost na leukémii v závislosti na dávce u osob, které přežily atomové bombardování v Japonsku

Obr. 1.6

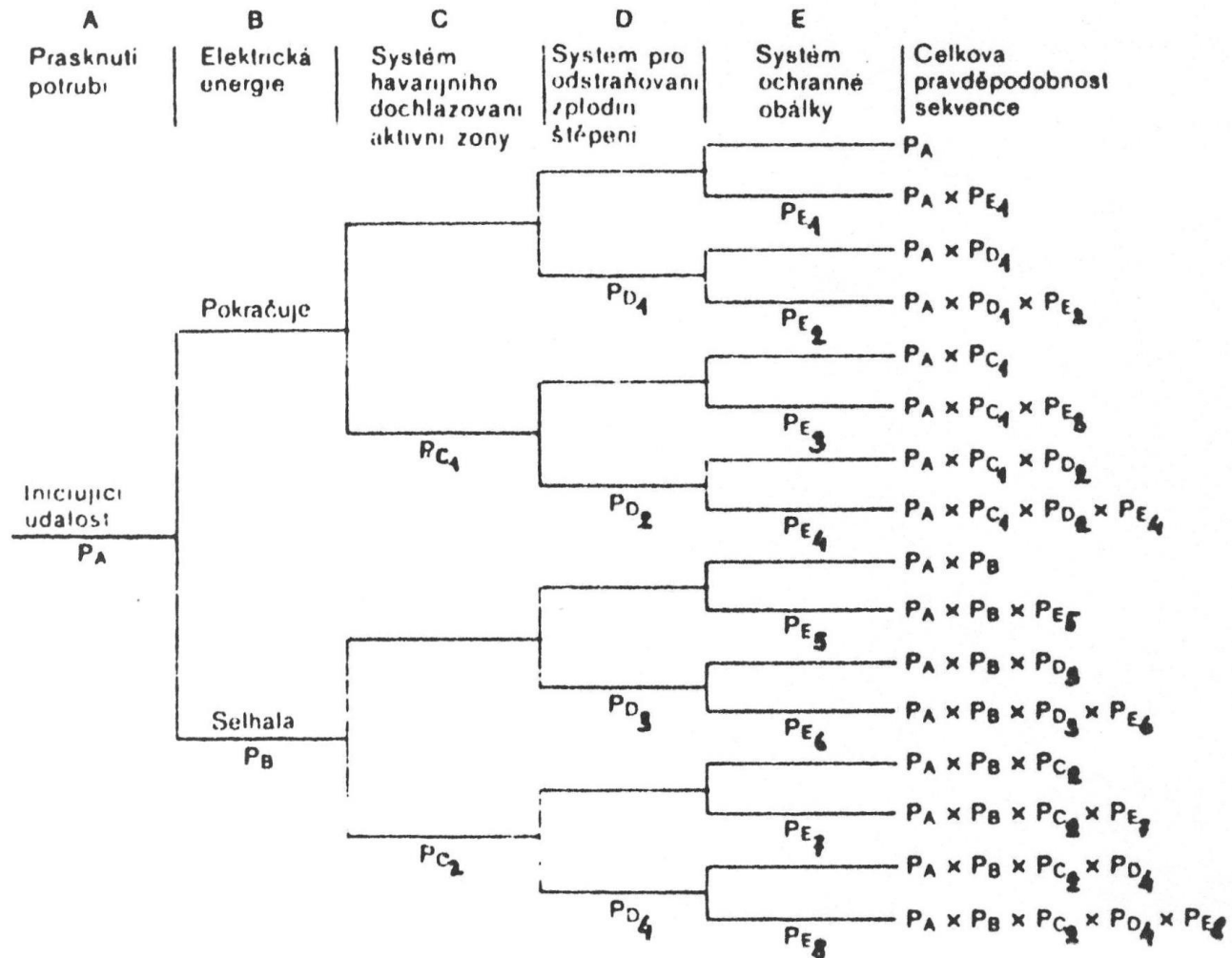
Závislost rizika na vynaložených nákladech.

Vynaložením vyšších nákladů lze riziko úmrtí při haváriích snižuje (křivka 1), zároveň však roste riziko při výrobě bezpečnostních zařízení (křivka 2). Je proto třeba uvážit součet obou rizik (křivka 3). Lze odhadnout, že absolutní hranicí pro snižování rizika R_0 je

***33 milionů dolarů
za jeden zachráněný život.***

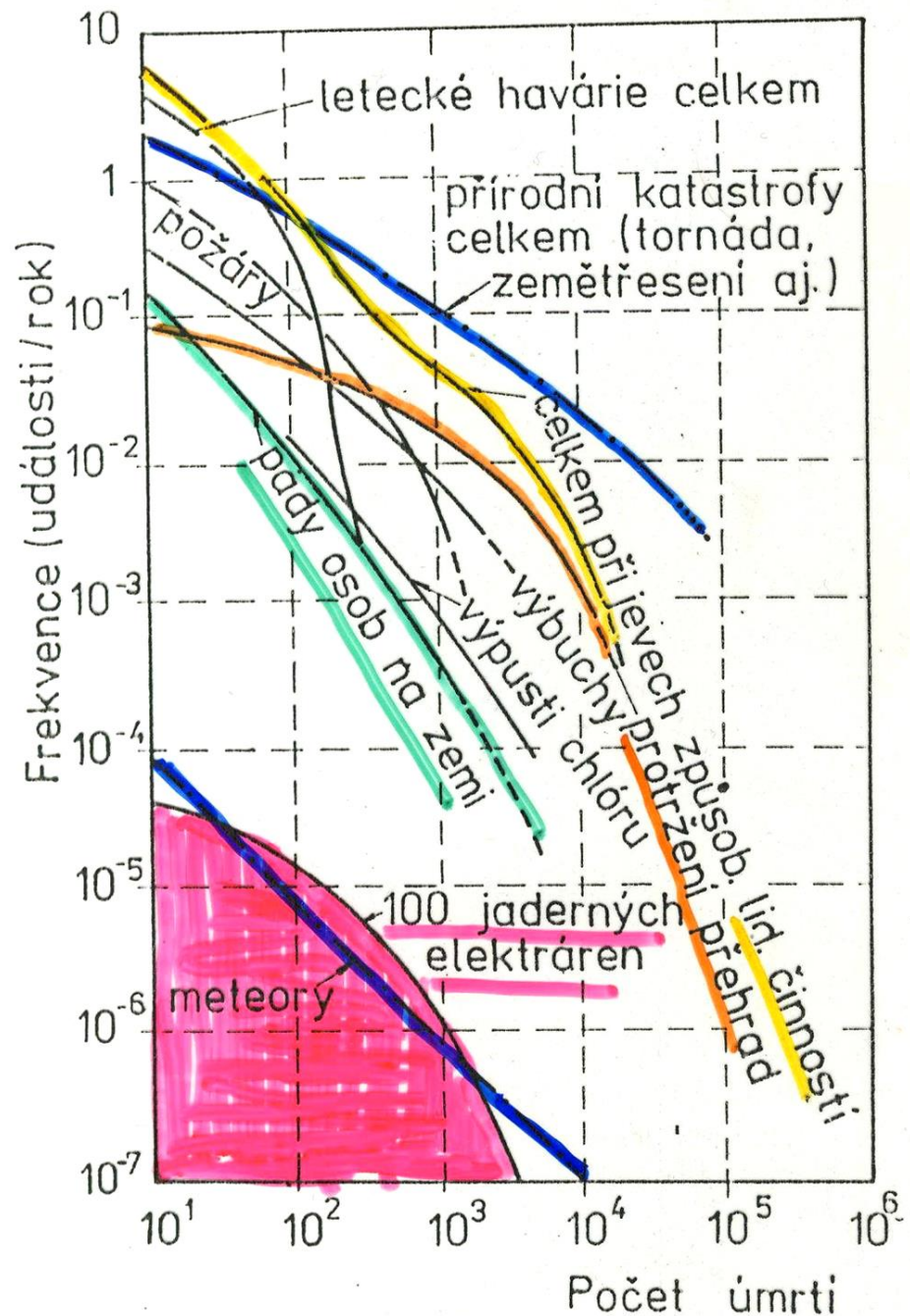


Analýza pomoci stromu událostí - příklad



Výsledky Rasmussenovy studie bezpečnosti 100 amerických jaderných elektráren

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





Safety Goals (NRC)

- 1. *Individual early fatality risk:* the expected value for average individual early risk in the region between the plant site boundary and 1609.3m (1 Mile) beyond this boundary will be less than 5×10^{-7} per year.**
- 2. *Individual latent cancer fatality risk:* the expected value for average individual latent cancer fatality risk in the region between the plant site boundary and 16,093m (10 miles) beyond this boundary will be less than 2×10^{-6} per year.**



Subsidiary Goals (NRC)

- **Expected core damage frequency $< 10^{-4}$ per reactor year.**
- **Expected conditional probability of containment failure < 0.1 .**
- **Large early release frequency $< 10^{-5}$ per reactor year.**



Quantitative Safety Goals of the US Nuclear Regulatory Commission

Early and latent cancer mortality risks to an individual living near the plant should not exceed 0.1 percent of the background accident or cancer mortality risk, approximately
 5×10^{-7} /year for early death and
 2×10^{-6} /year for death from cancer.