



ENERGIE

?!?



POZOR !

**NÍŽE UVEDENÁ DATA
MAJÍ OBČAS
„POLITICKÝ“
CHARAKTER.**

**AUTOR NENÍ OCHOTEN
DÁT ZA UVÁDĚNÁ DATA
RUKU DO OHNĚ.**

UVÁDĚNÉ JEDNOTKY

1 BTU = British thermal unit = 1.055 kJ

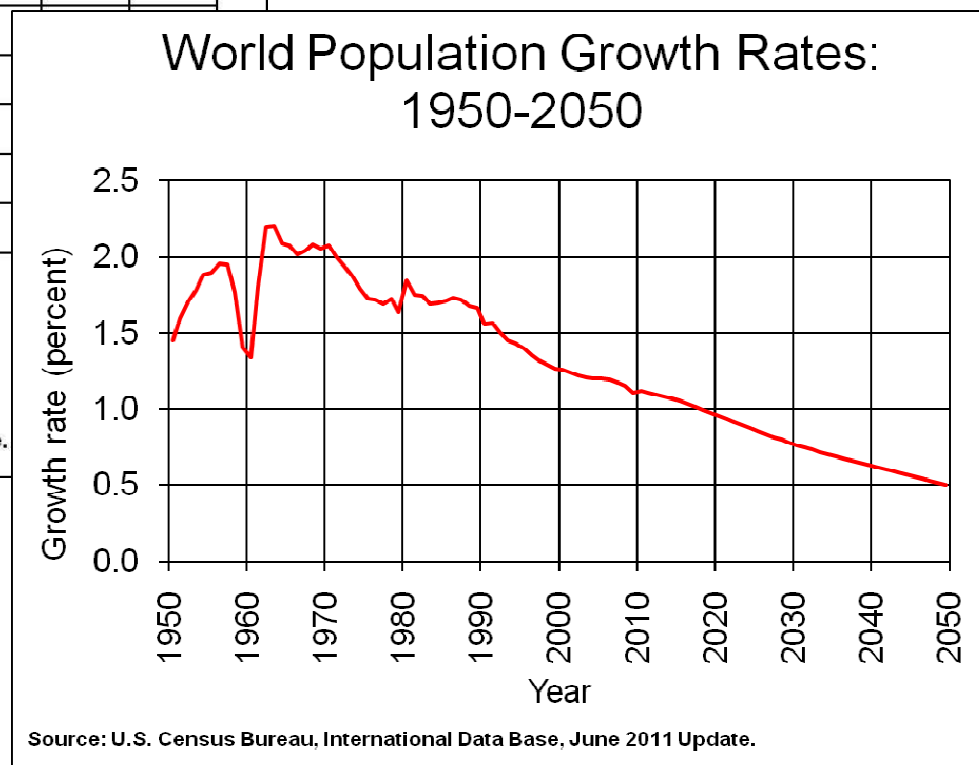
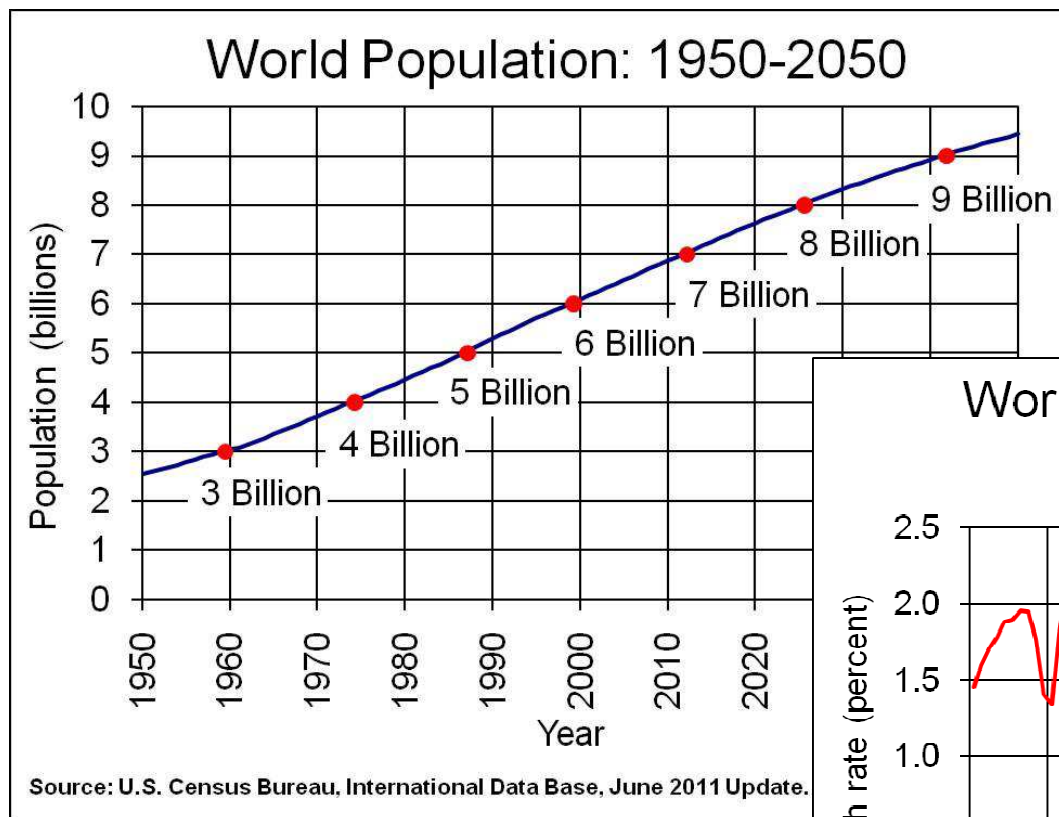
**1 toe = tonne oil equivalent = ekvivalent
ropné tuny**

= 7.4 barelů ropy

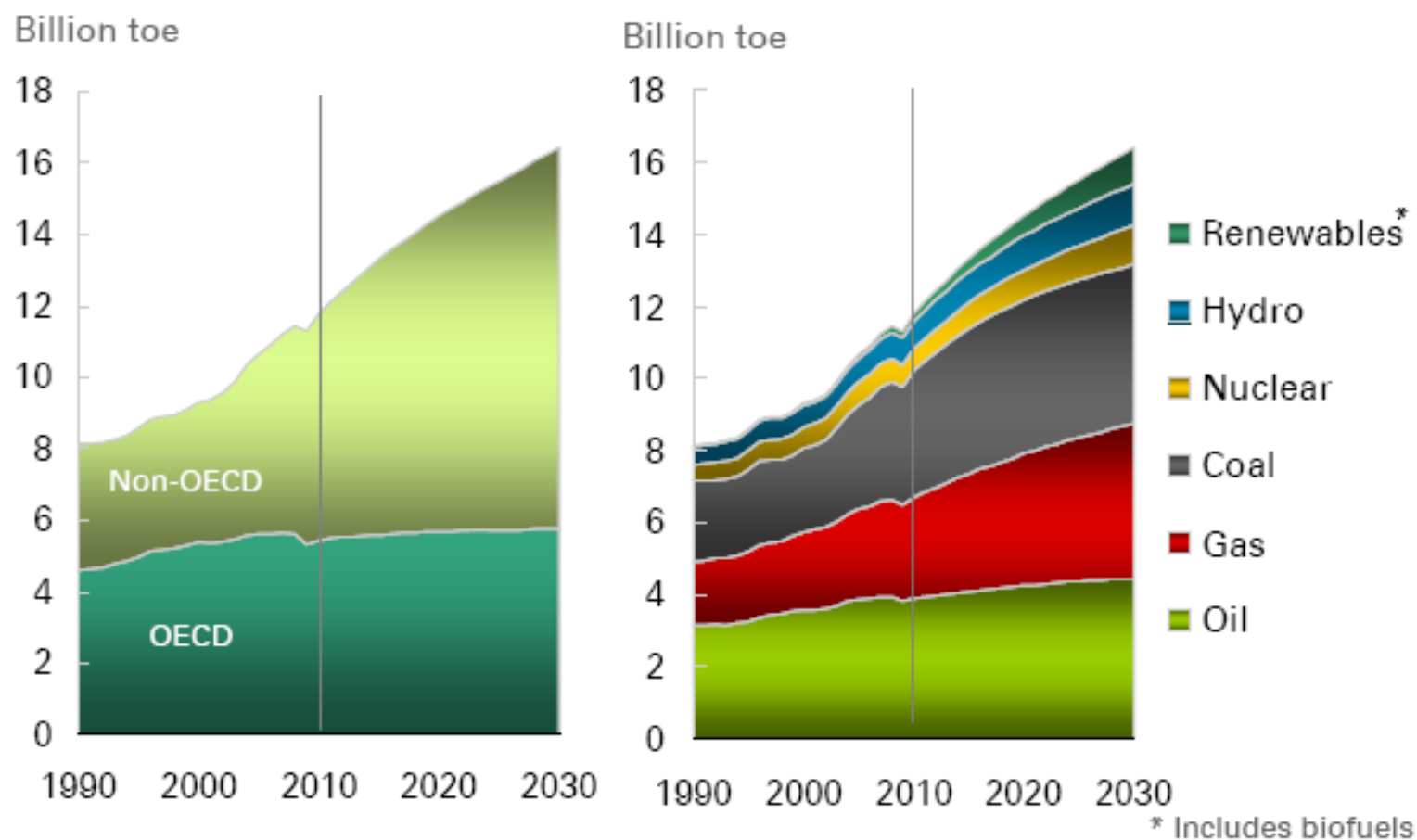
= 1270 m³ zemního plynu

= 2.3 tun uhlí

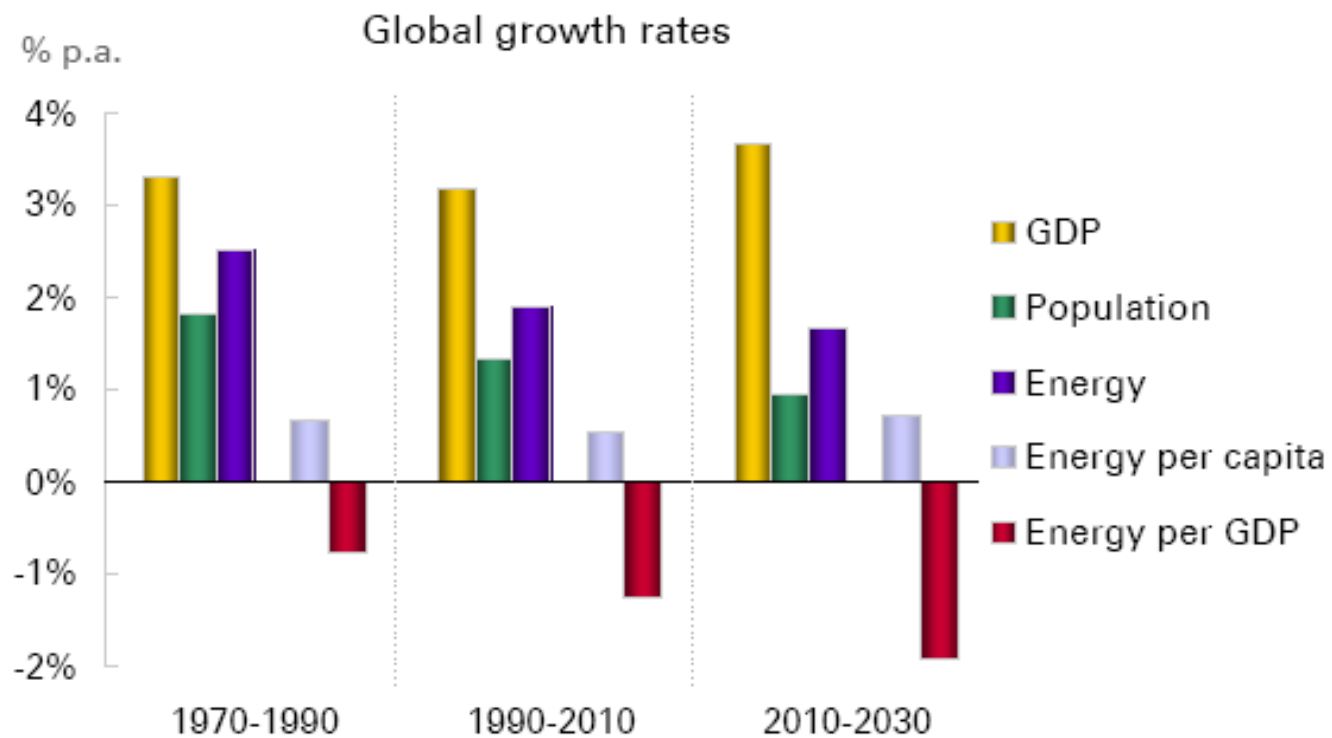
= 41.9 GJ



**POPULACE ROSTE A POROSTE –
DNES 7.2 MLD A PŘÍRŮSTEK 1.1 % / ROK**

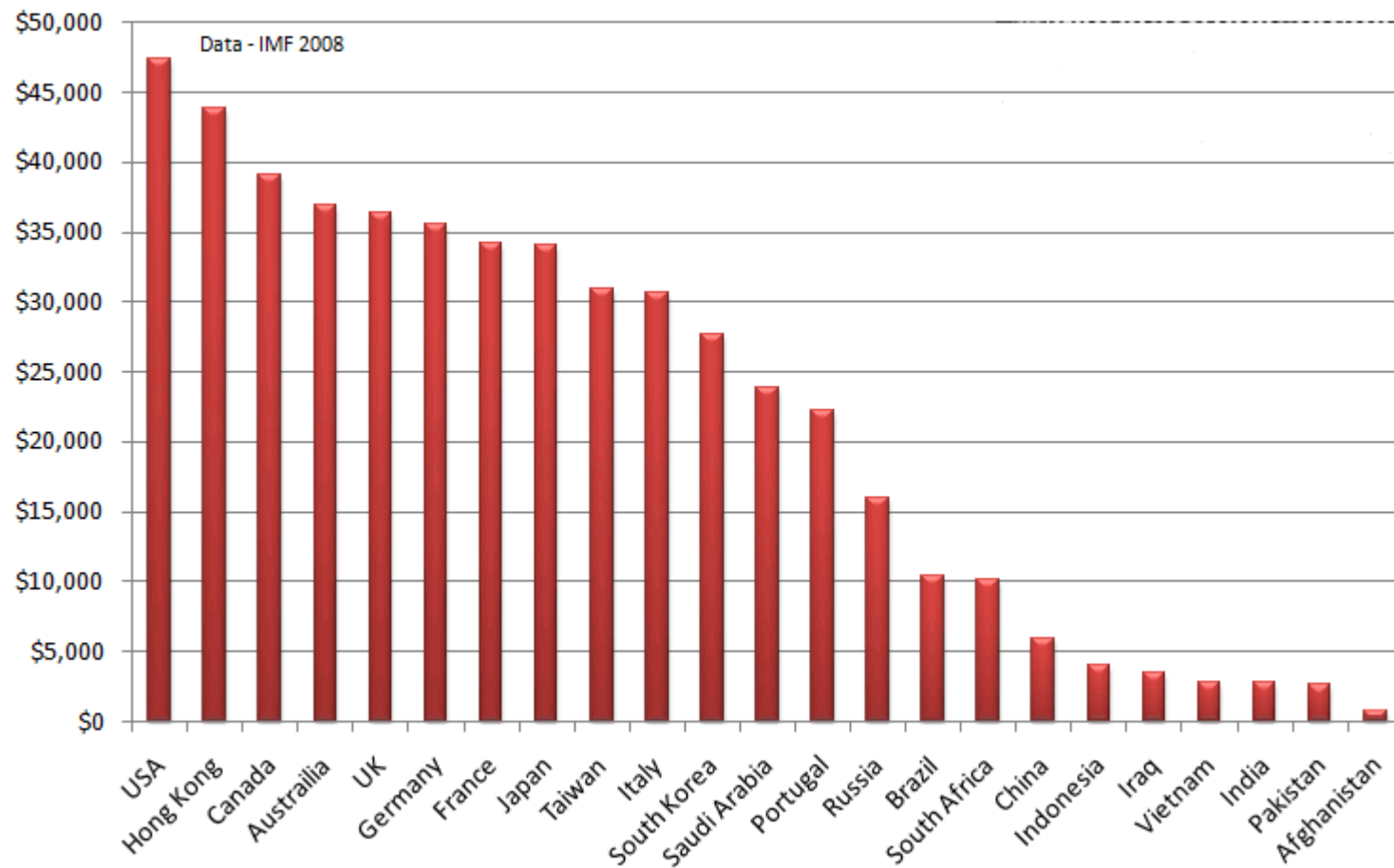


**SPOTŘEBA ROSTE A POROSTE –
DNES 11.8 Gtoe = 490 EJ, PŘÍRŮSTEK 1.6%/ROK**



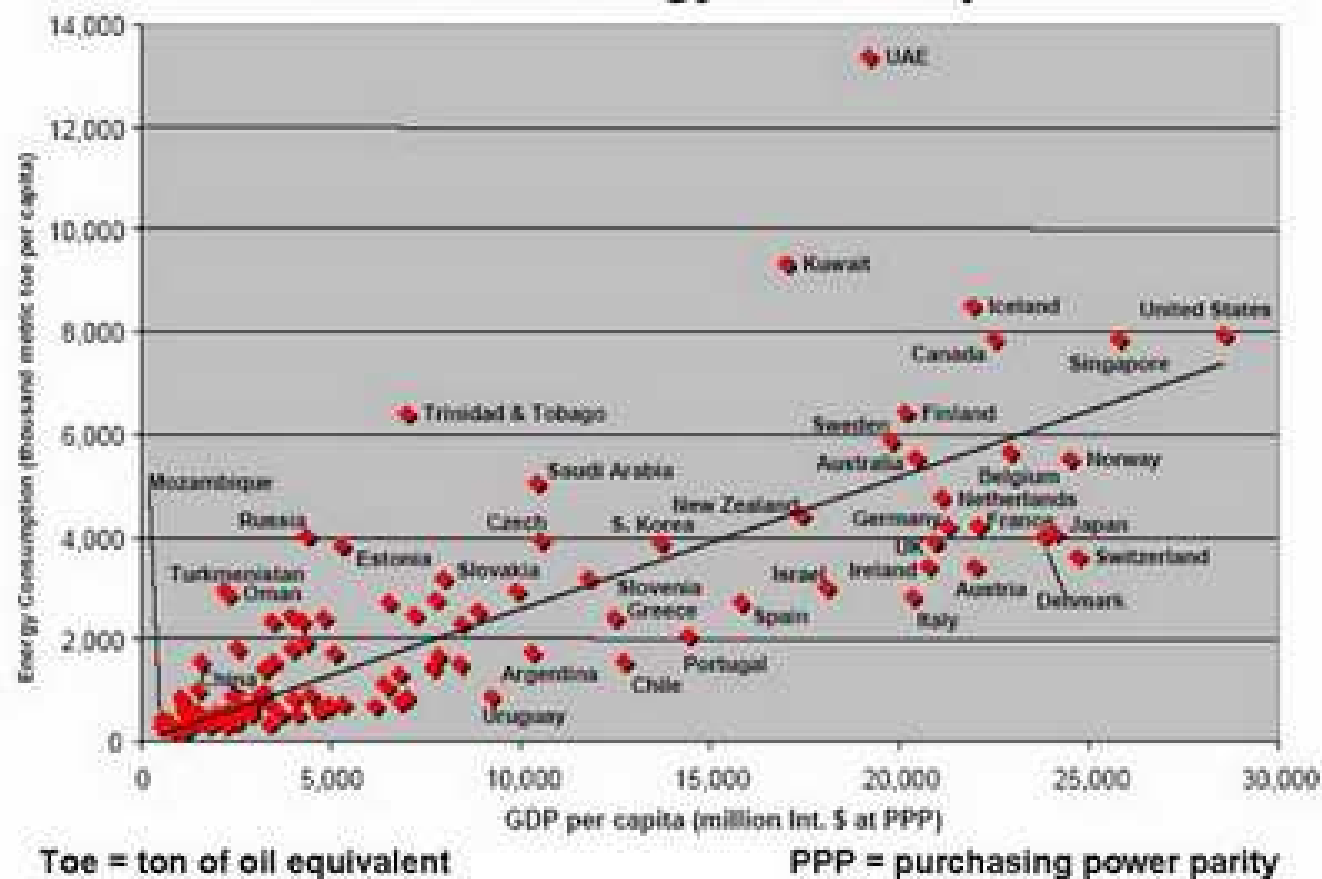
SNAD POROSTE I HDP NA HLAVU

World Economies GDP per Capita



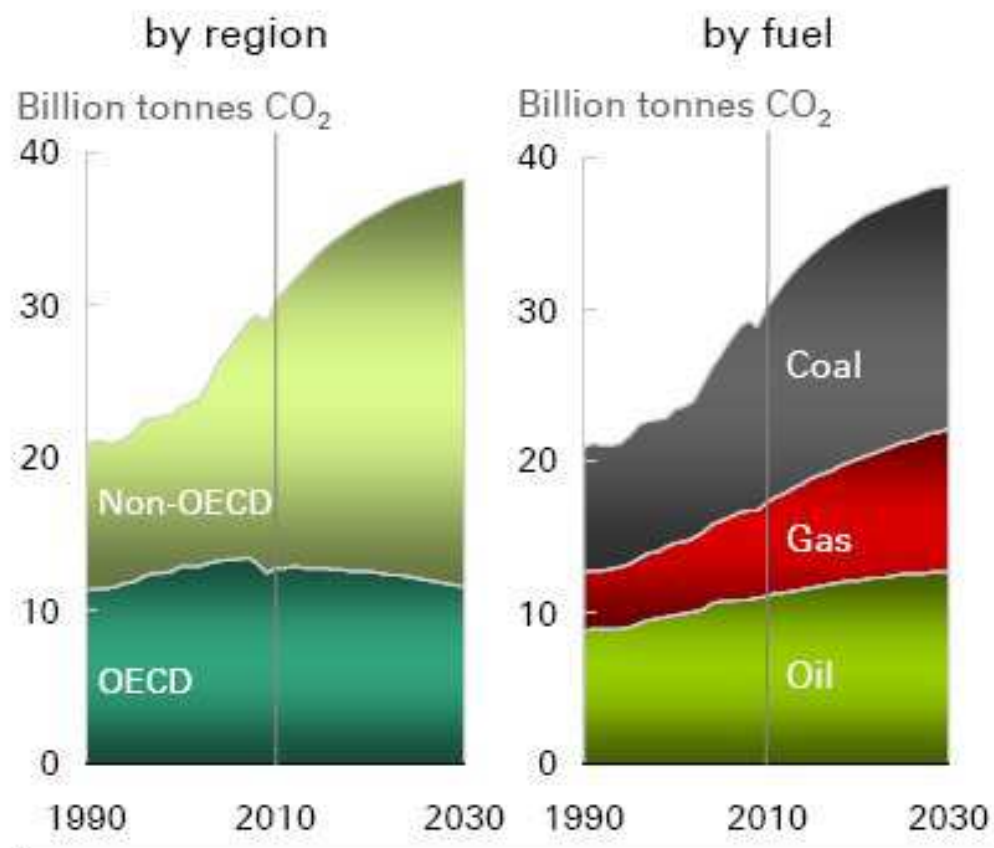
TAKHLE TO VYPADALO NEDÁVNO

GDP vs. Energy Consumption



ŽIVOTNÍ ÚROVEŇ A SPOTŘEBA ENERGIE

Global CO₂ emissions from energy use



PRAVDA ZASVINÍME TROCHU ATMOSFÉRU

FOSILNÍ PALIVA PRODUKUJÍ CO₂

ZEMNÍ PLYN

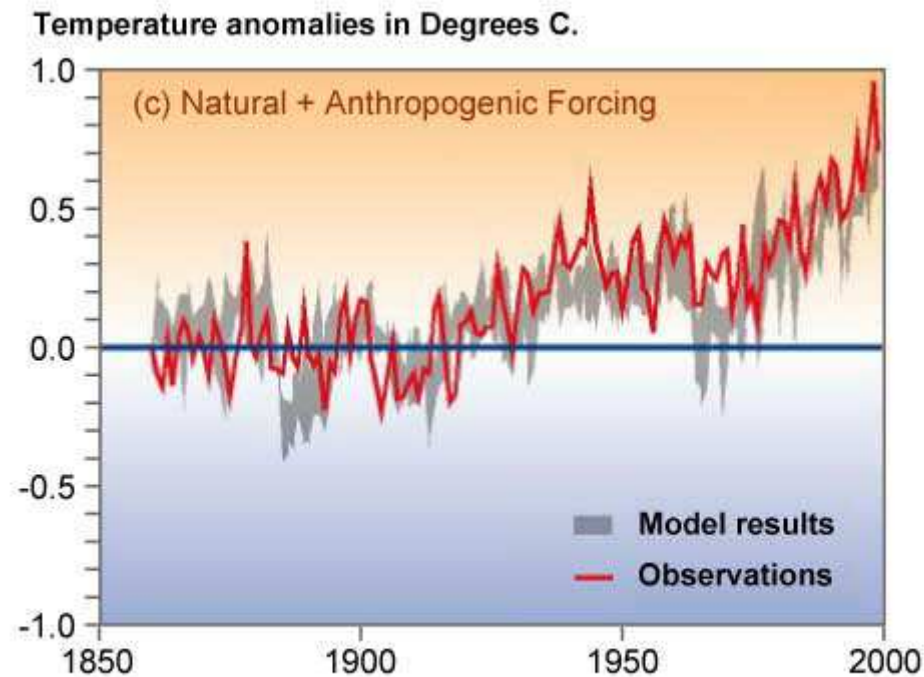
2.3 tCO₂/toe

ROPA

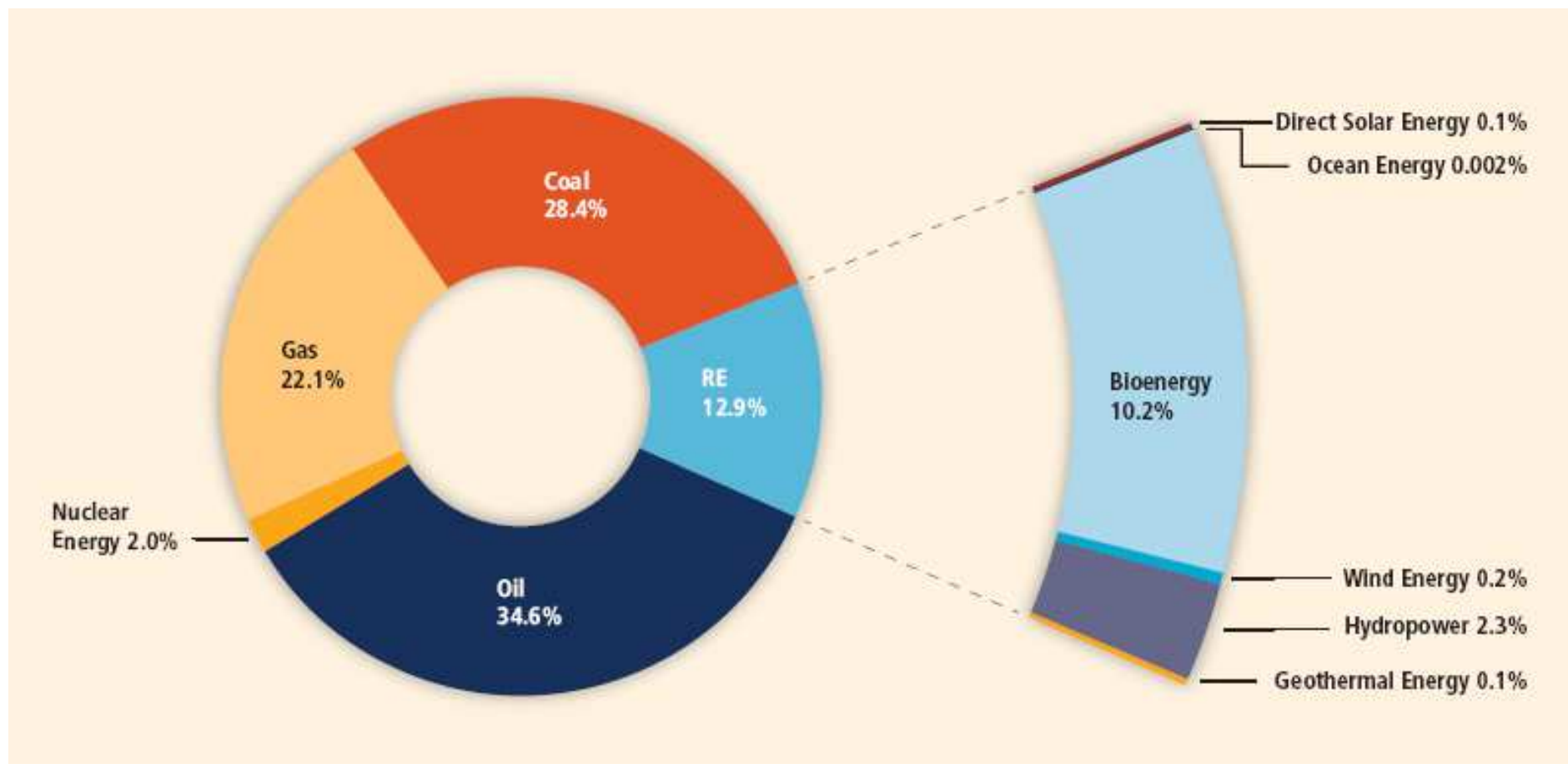
2.8 tCO₂/toe

UHLÍ

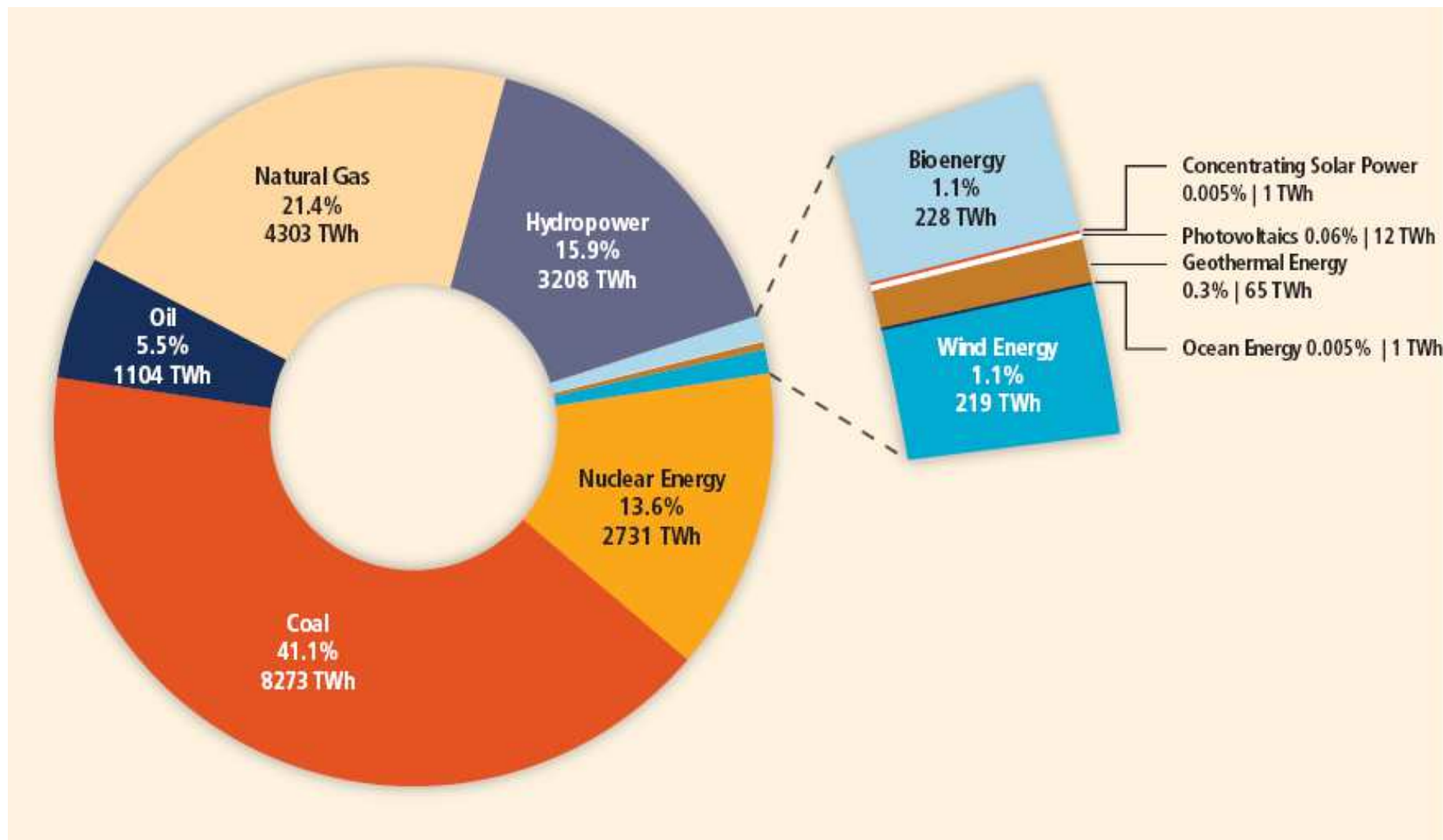
3.8 tCO₂/toe



A TEPLOTA
ROSTE



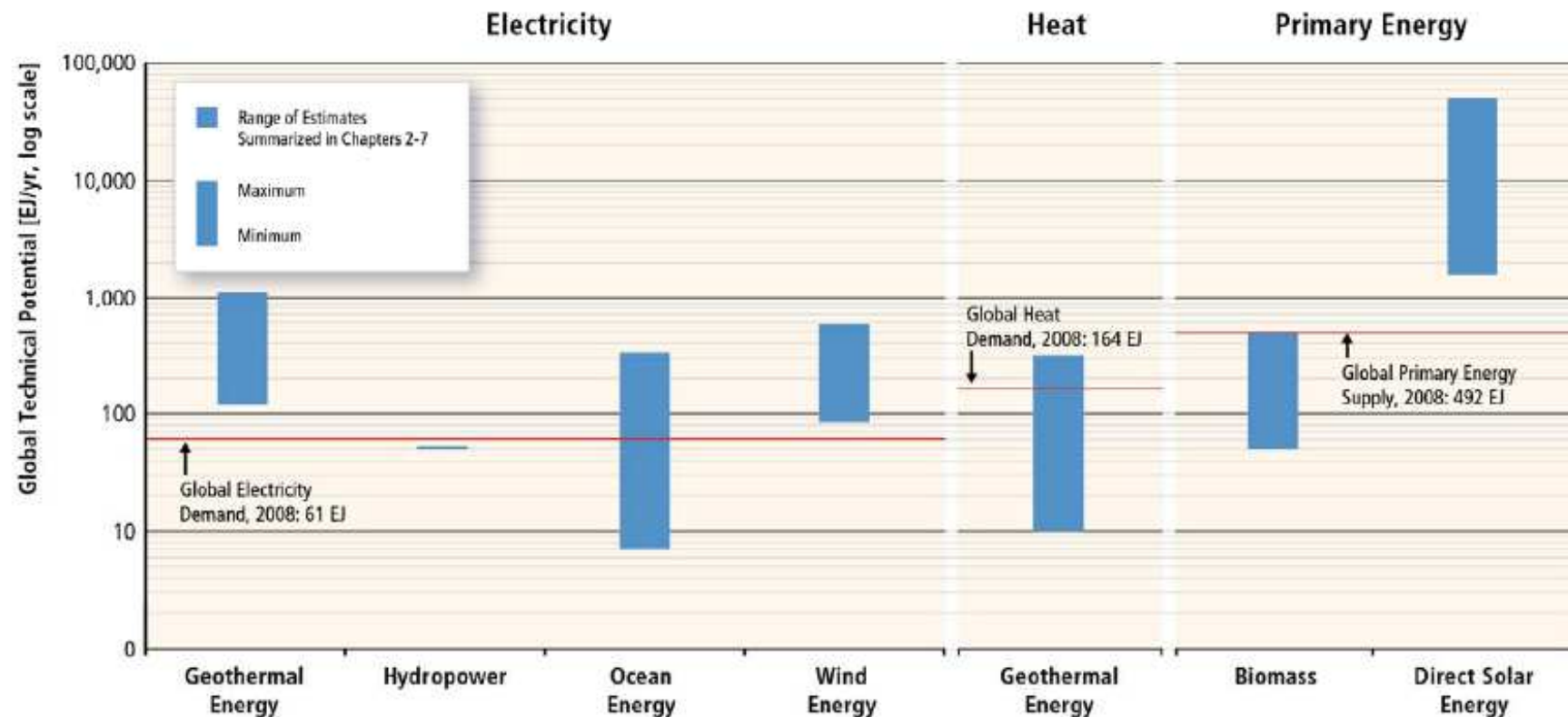
PRIMÁRNÍ ZDROJE
CELKOVÁ SPOTŘEBA **492 EJ (2008)**



VÝROBA ELEKTŘINY CELKEM 20 PWh

POTENCIÁL OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

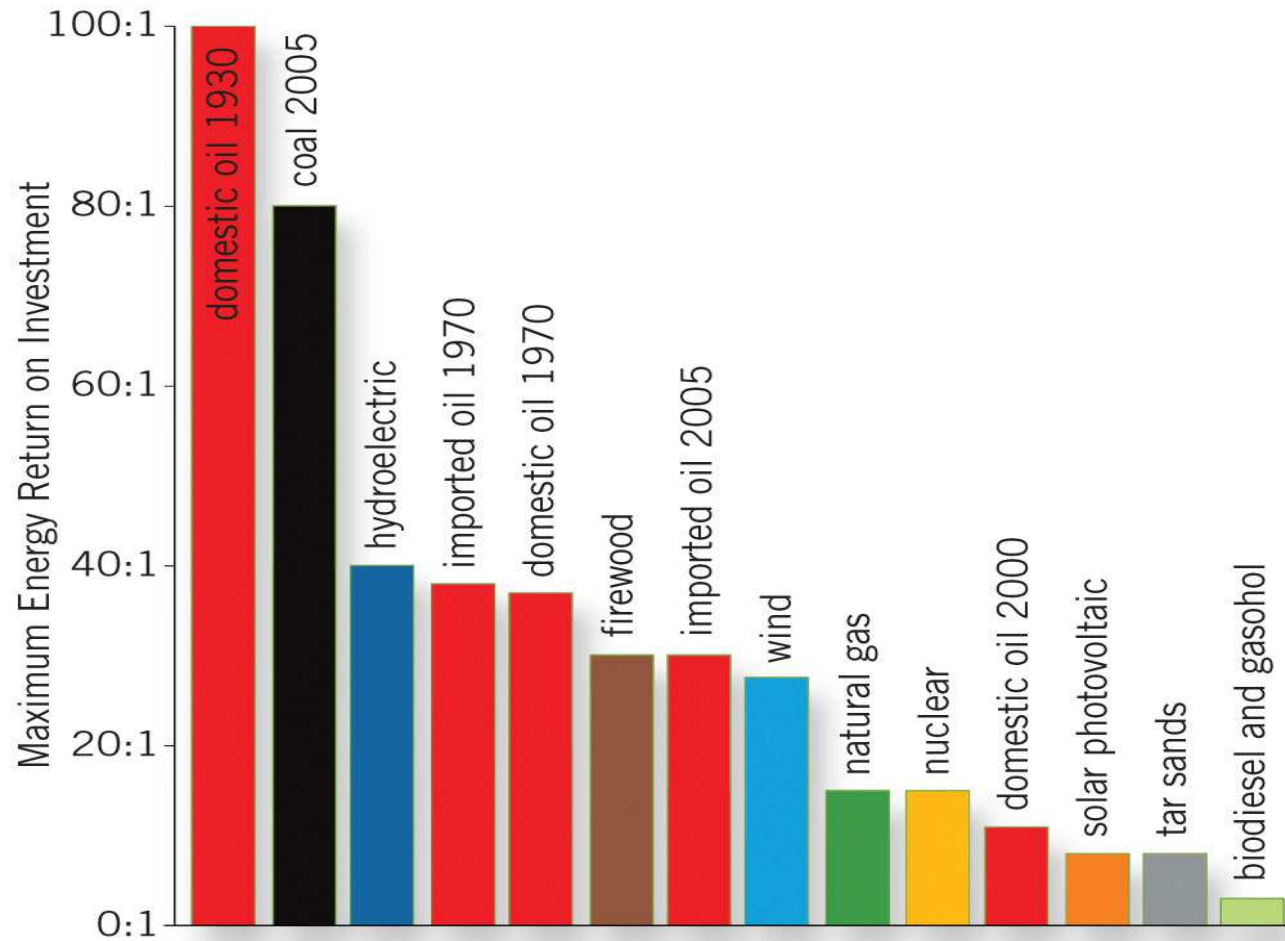
The technical potential of renewable energy technologies to supply energy services exceeds current demands.



Range of Estimates of Global Technical Potentials

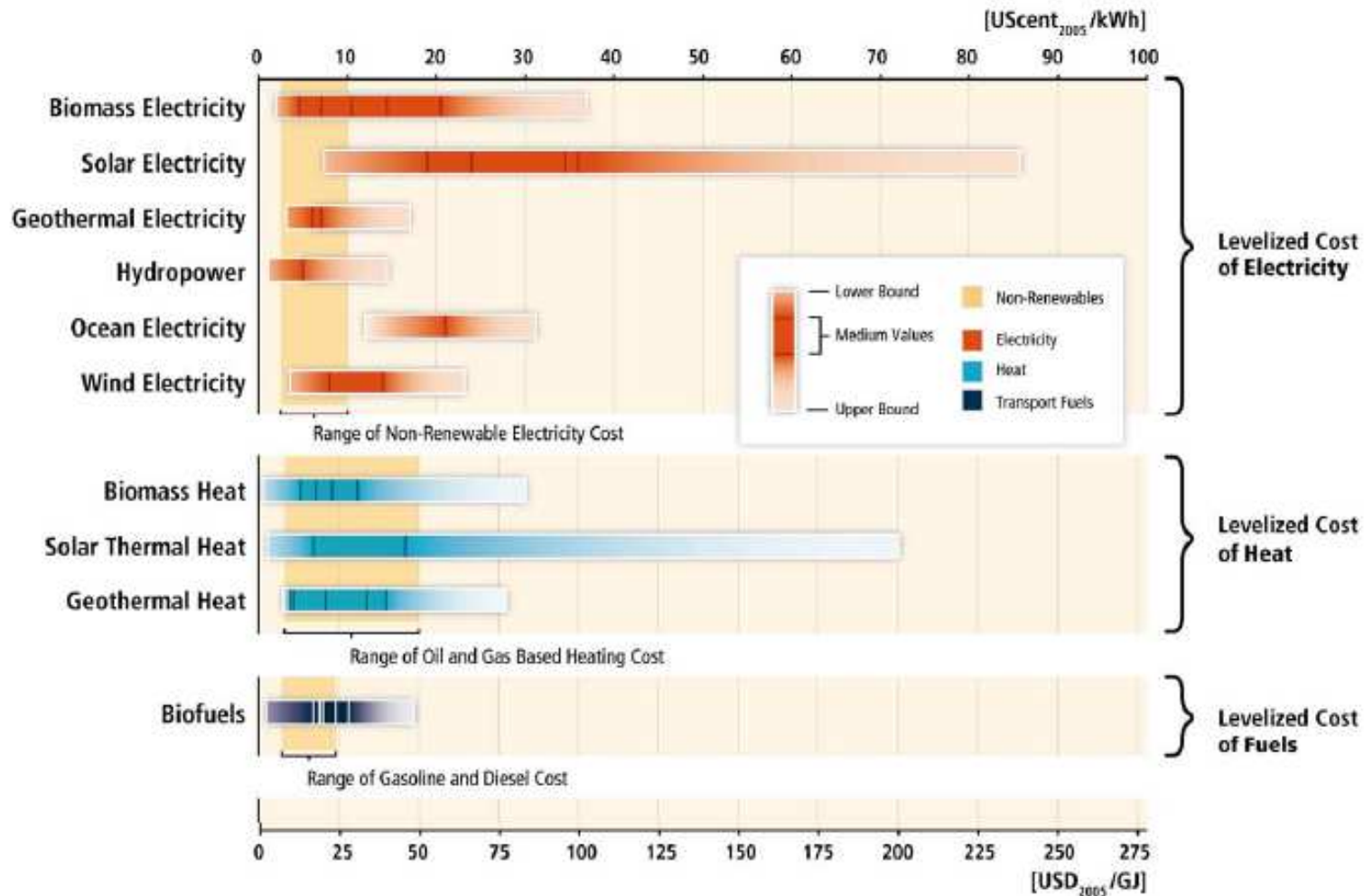
Max (in EJ/yr)	1109	52	331	580	312	500	49837
Min (in EJ/yr)	118	50	7	85	10	50	1575

ENERGY RETURN ON (ENERGY) INVESTED – EROI



CENY

RE costs are still higher than existing energy prices, but in various settings RE is already competitive.



ENERGETICKÉ ZÁSoby

ROPA 190 Gt

SPOTŘEBA 4Gt / ROK – VYDRŽÍ 46 LET

ZEMNÍ PLYN 190 T m³

SPOTŘEBA 3 T m³ / ROK – VYDRŽÍ 59 LET

UHLÍ 860 G t

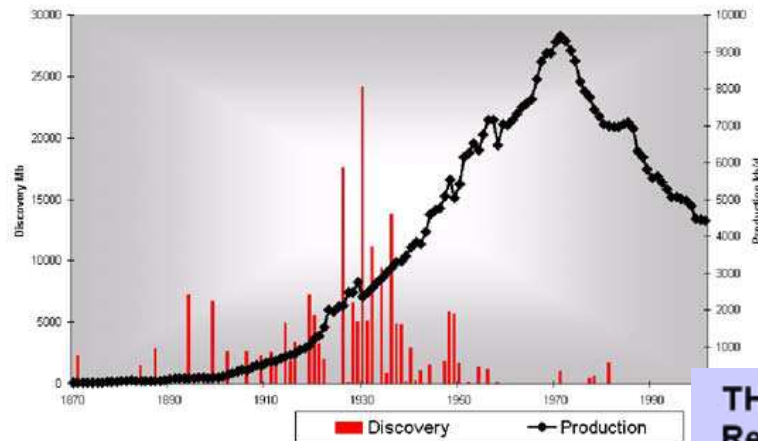
SPOTŘEBA 4 G t / ROK – VYDRŽÍ 118 LET

URAN 5.5 Mt

SPOTŘEBA 51 kT / ROK – VYDRŽÍ 108 LET
(DNEŠNÍ ZPŮSOB VYUŽITÍ)

HROZÍ NÁM ROPNÝ VRCHOL ?

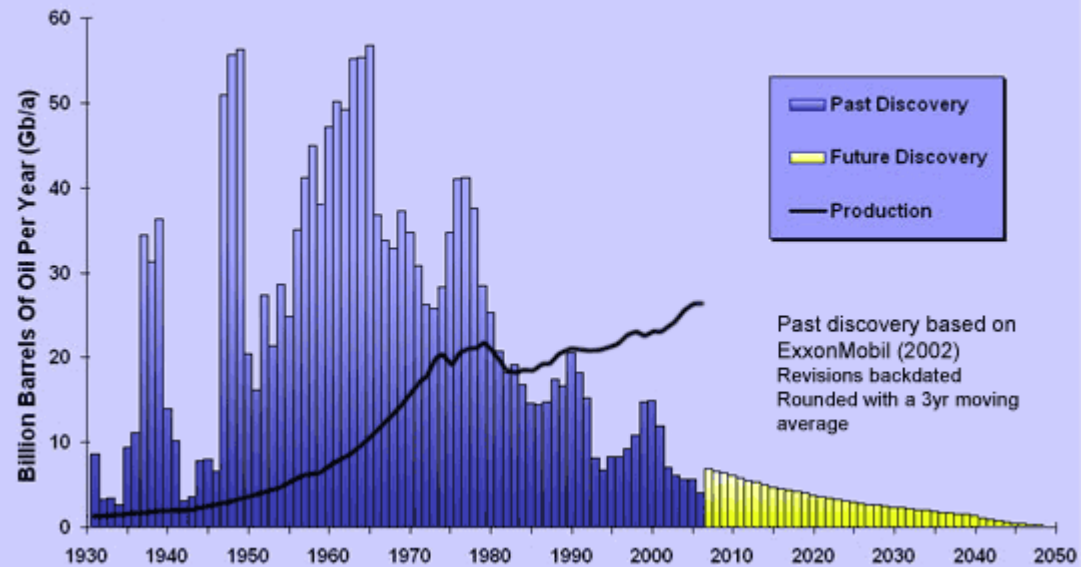
US-48



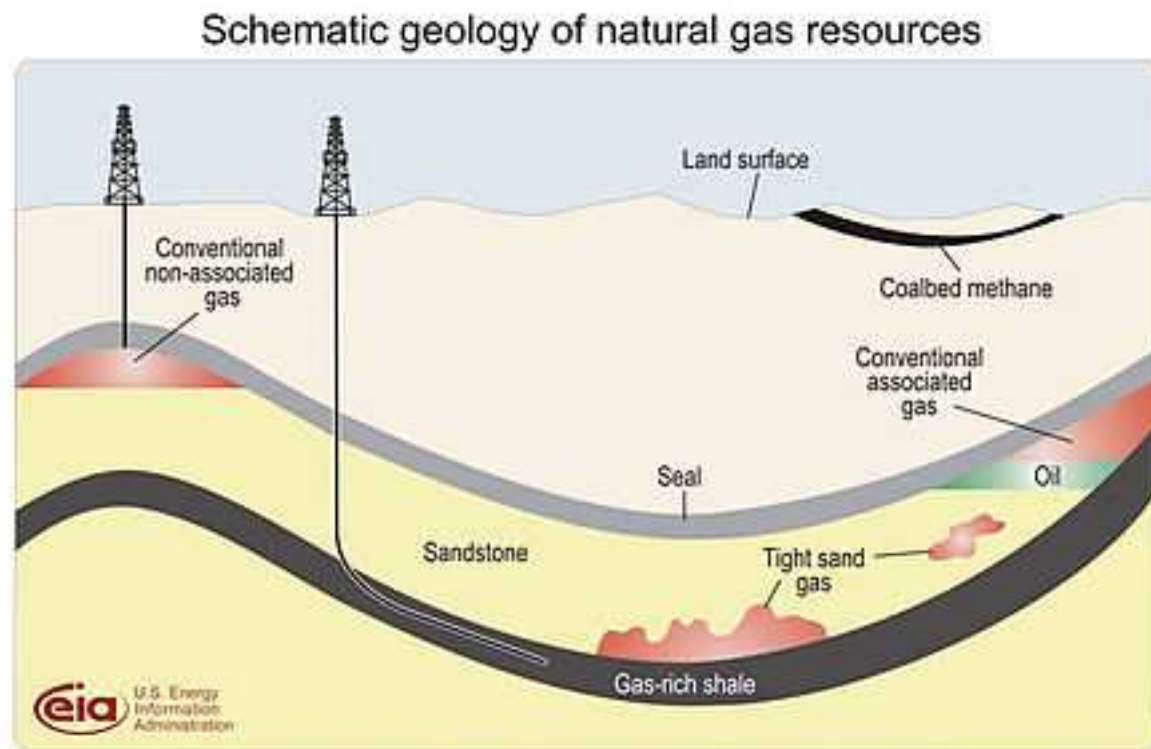
← PŘEDPOVĚZENÝ

PŘEDPO
VÍDANÝ →

THE GROWING GAP
Regular Conventional Oil: Discovery & Production

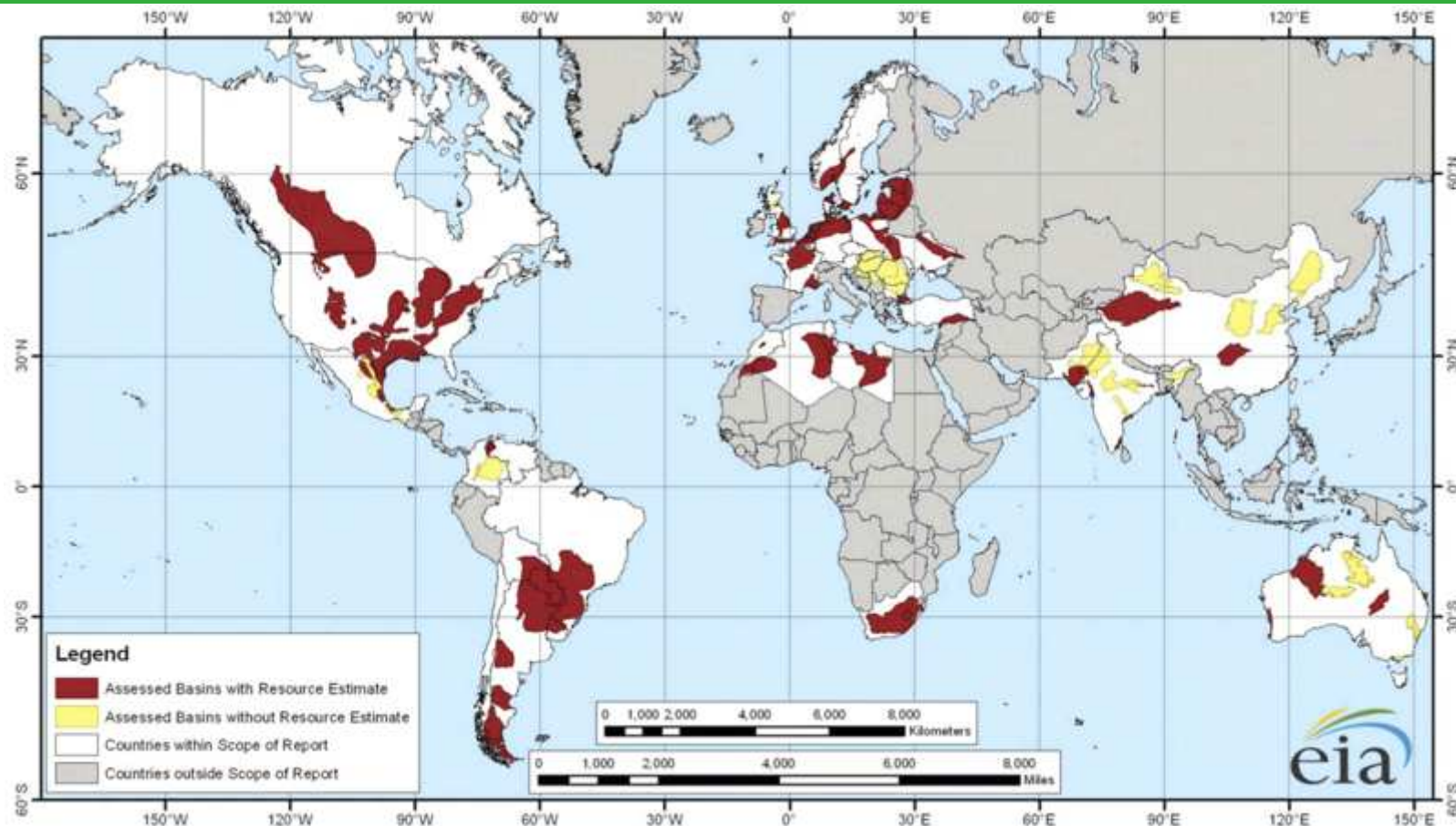


NOVÁ NADĚJE : BŘIDLICOVÝ PLYN ?



= ZEMNÍ PLYN ODJINUD

TECHNICKY VYUŽITELNÝ PLYN VÝSKYT



Čína 31 Tm³, Argentina 22 Tm³, Alžírsko 20 Tm³,
USA 19 Tm³, Kanada 16 Tm³... $\Sigma = 200 \text{ Tm}^3$

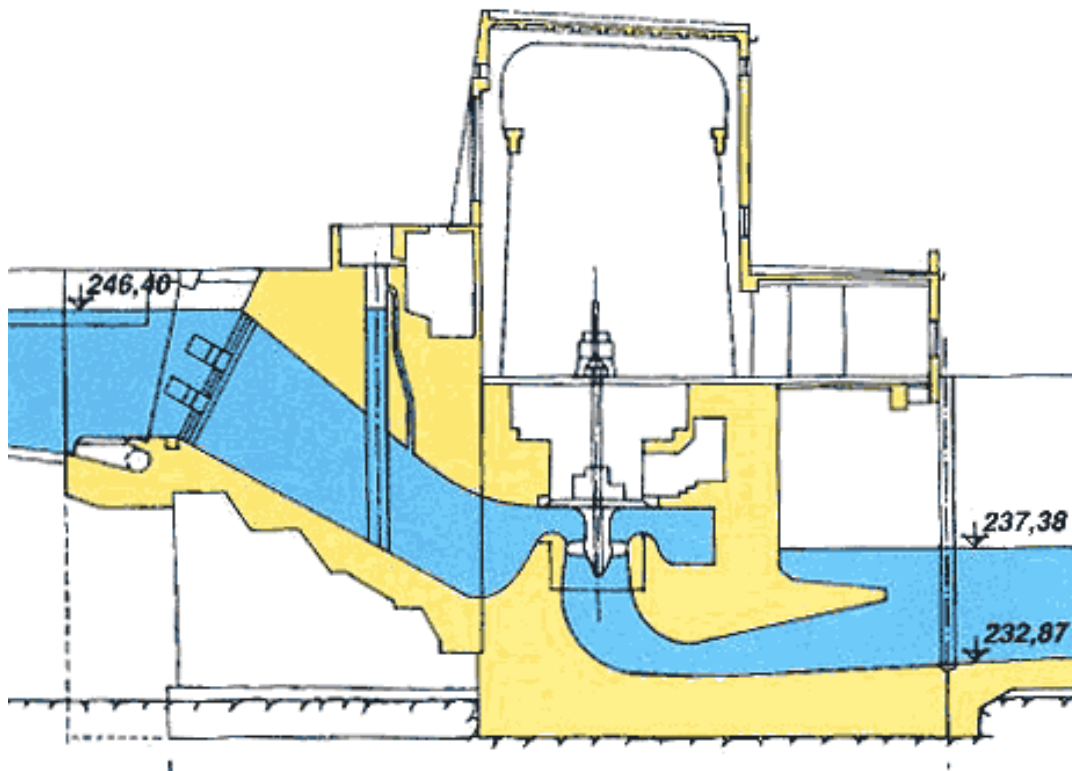
VODNÍ ELEKTRÁRNY

SOUČASNÁ ROČNÍ VÝROBA	cca 12 EJ
TEORETICKÝ POTENCIÁL	cca 50 EJ
VYUŽITÍ	cca 50 %

VELKÉ ELEKTRÁRNY NEGATIVNĚ
OVLIVŇUJÍ ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

PŘEHRADNÍ NÁDRŽE JSOU ZDROJEM
 CO_2 A CH_4

MALÉ ELEKTRÁRNY JSOU MÉNĚ ÚČINNÉ



ME Smiřice Labe

ZDE :

$$\eta = 0.8$$

$$Q = 34 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 1000$$

$$\text{kg/m}^3 \quad g = 9.8$$

$$\text{m/s}^2 \quad \Delta h = 9$$

$$\text{m}$$

TAKŽE

$$P = 2.4 \text{ MW}$$

$$\text{VÝKON } P = \eta Q \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

η = ÚČINNOST, Q = PRŮTOK,

ρ = HUSTOTA VODY, g =

GRAVITAČNÍ ZRYCHLENÍ,

Δh = SPÁD

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

POTENCIÁL 220 EJ/a tj. 7 TW

INSTALOVÁNO 200 GW

VYUŽITÍ 20 % (?)

PROBLÉMY :

RELATIVNĚ MALÁ HUSTOTA
ENERGIE VĚTRU

VÍTR NEFOUKÁVÁ PRAVIDELNĚ

JEDNODUCHÁ TEORIE :

VÝKON VĚTRU $P = 1/2 \rho A V V^2$

SÍLA NA VRTULI $F = \Delta p A = 1/2 \rho A (V^2 - V'^2)$

RYCHLOST VRTULE $V_v = 1/2 (V + V')$

VÝKON NA VRTULI

$$P_v = F \cdot V_v = 1/4 \rho (V^2 - V'^2) \cdot (V + V')$$

JE MAXIMÁLNÍ PRO $V' = 1/3 V$ A ROVEN

$$P_v = 16/27 P$$

REÁLNÝ VÝKON JE MENŠÍ.

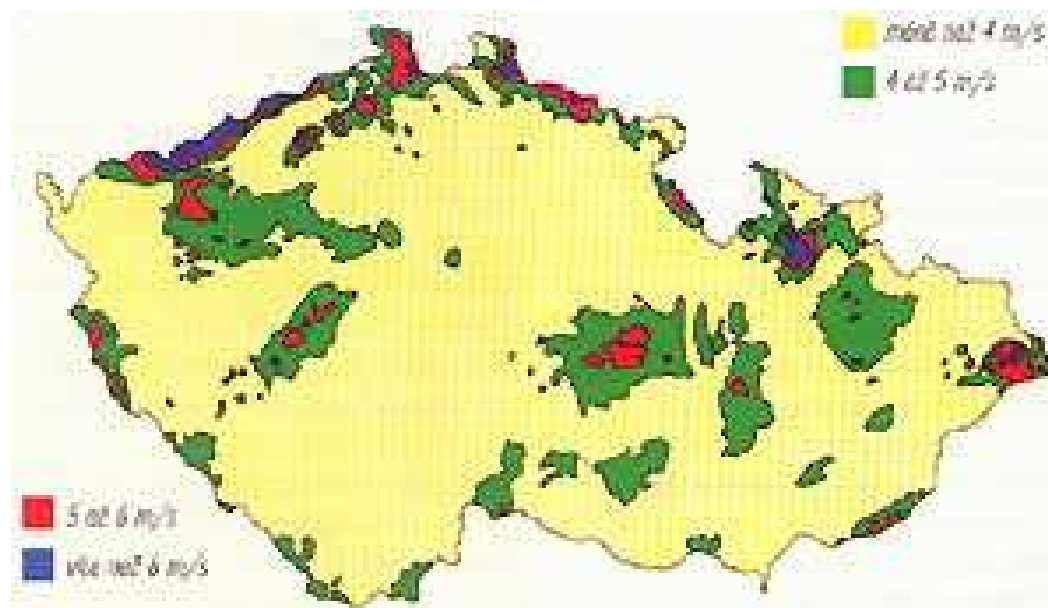
$P = 650 \text{ W/m}^2$
pro $V = 10 \text{ m/s}$!

$P_{vm} = 270 \text{ kW}$ pro
vrtuli o $\phi = 30 \text{ m}$

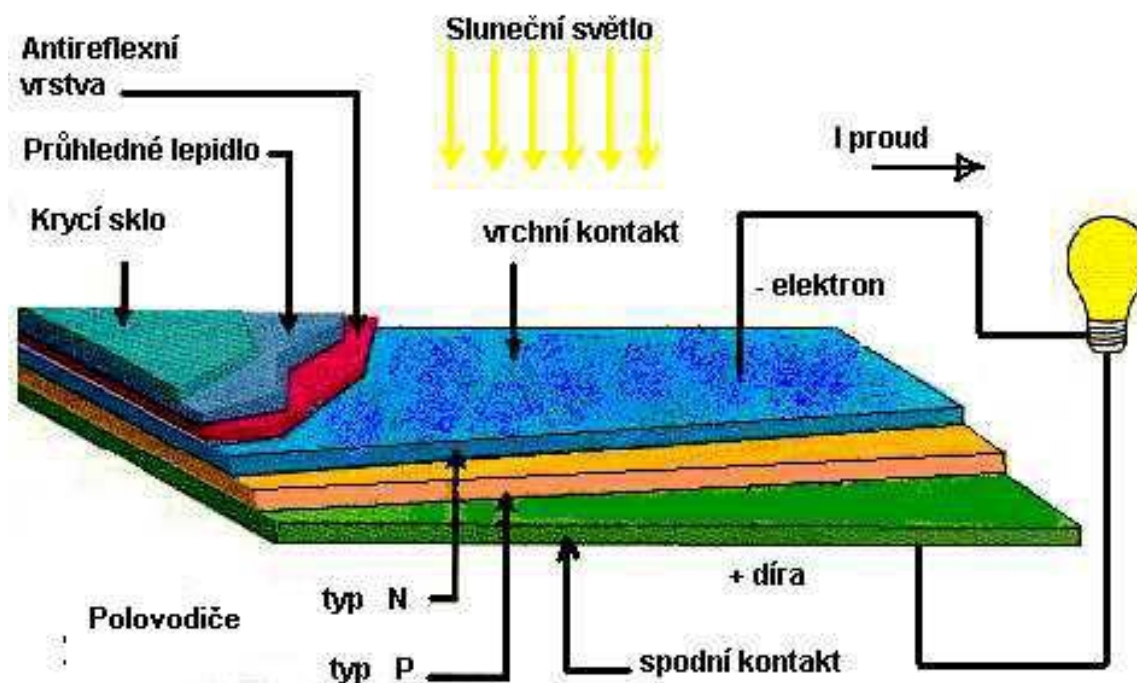


FARMA V COLORADU

MOŽNOSTI V ČESKU



FOTOVOLTAIKA



**DOPADAJÍCÍ FOTONY VYTVÁŘEJÍ PÁR
ELEKTRON-DÍRA – TEN VYTVÁŘÍ PROUD**

POTENCIÁL	9000 EJ/a tj. 300 TW
INSTALOVÁNO	40 GW
VYUŽITÍ	15 % (?)

JEDNODUCHÁ TEORIE

PROUD PŘI OSVĚTLENÍ

$$I_f = e \int \gamma(\omega) E(\omega) d\omega$$

$E(\omega)$ = OSVĚTLENÍ,

$\gamma(\omega)$ = KVANTOVÁ VÝTĚŽNOST

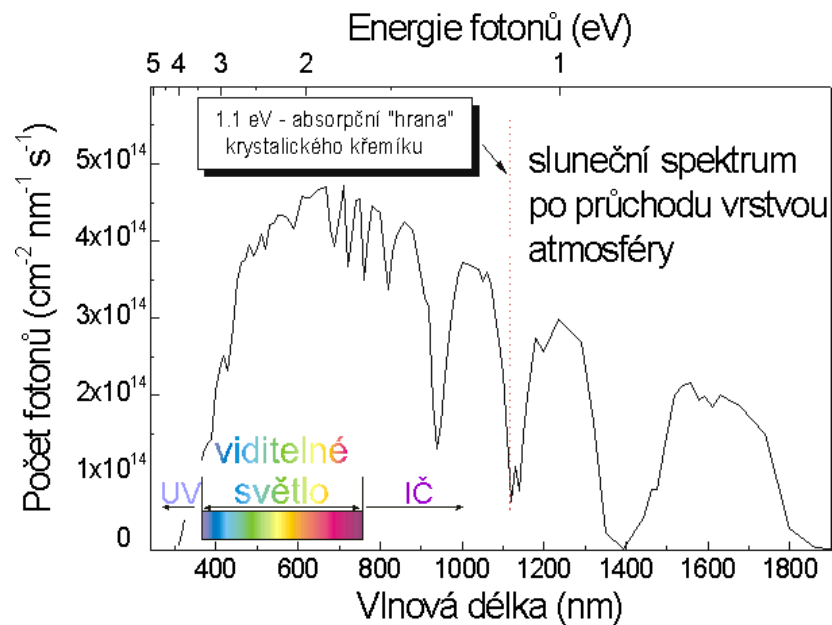
PŘI ZATÍŽENÍ $I = I_f - I_o(\exp(eU/k_B T) - 1)$

ODTUD NAPĚTÍ NA PRÁZDNO

$$U_\infty = k_B T / e \ln(1 + I_f / I_o)$$

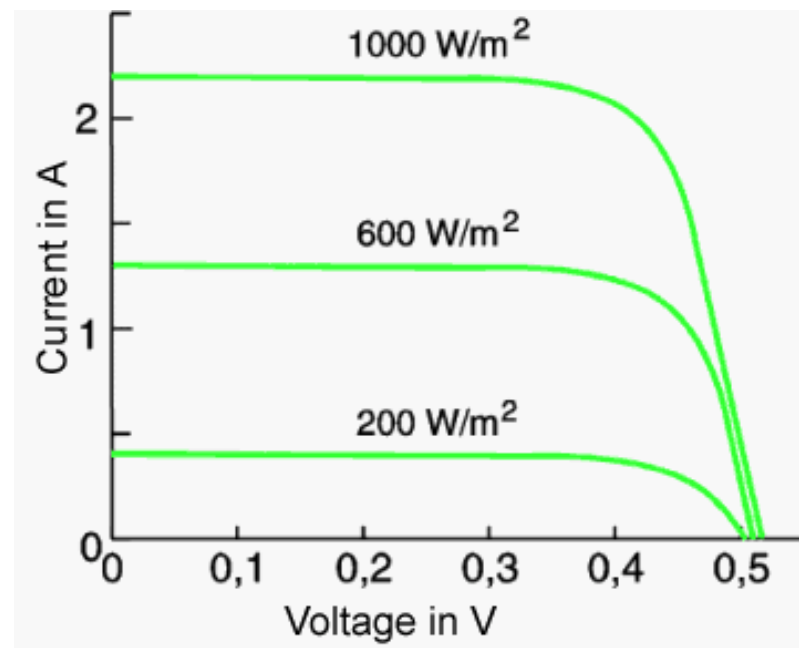
MAX VÝKON $P_M = FF \cdot I_f U_\infty$

FF = FAKTOR ZAPLNĚNÍ



**KŘEMÍKOVÝ
ČLÁNEK
REAGUJE JEN
NA FOTONY
S ENERGIÍ
NAD 1.1 eV**

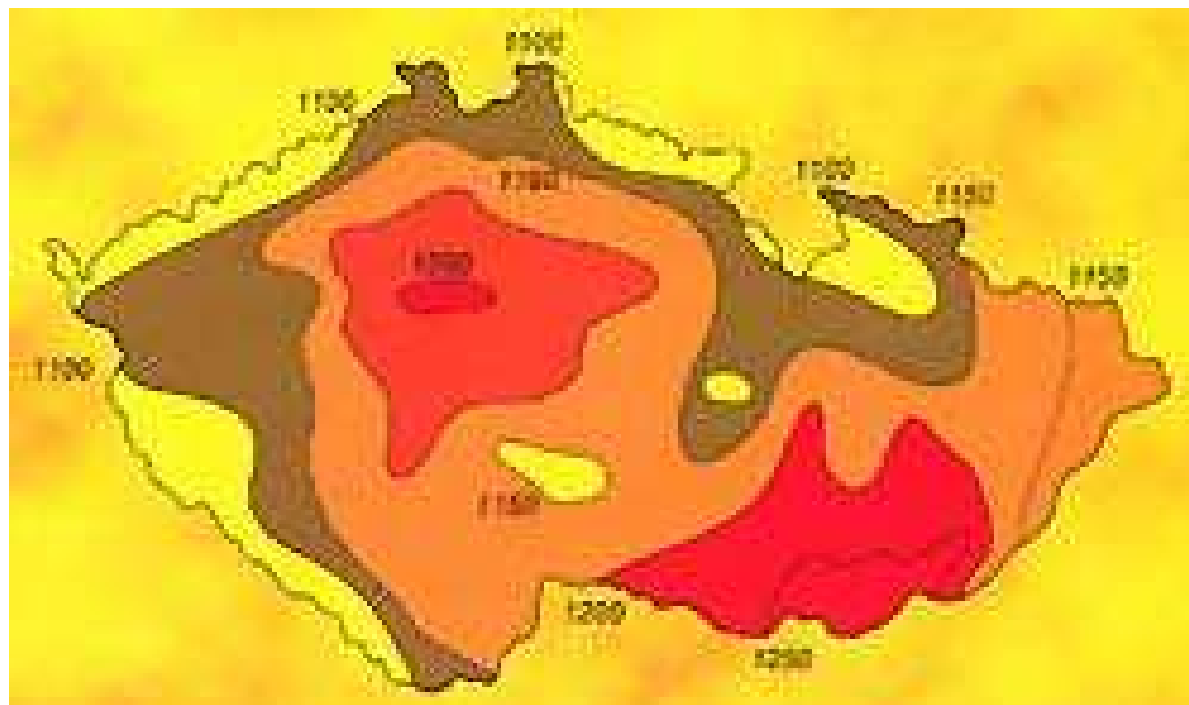
**TYPICKÉ
VOLTAMPÉROVÉ
CHARAKTERISTIKY**



PARAMETRY ČLÁNKŮ

TYP	I_f A/dm ²	U_∞ V	FF %	ÚČIN %
Kryst Si	4.2	0.71	83	25
poly Si	3.8	0.65	80	20
amorfní Si	1.9	0.89	74	13
kryst GaAs	2.8	1.02	87	25
CdTe	2.6	0.85	75	16
CuInGaSe ₂	3.6	0.67	77	19

PROBLÉM : MALÁ HUSTOTA TOKU SLUNEČNÍ ENERGIE



1000 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ odpovídá 228 W/m^2 ve dne

A CENA !

BIOMASA

POTENCIÁL 160 EJ/a tj. 5 TW

INSTALOVÁNO 60 GW
(85% TRADIČNÍ (?))

ŘEPKA NA SLÁMU
VÝHŘEVNOST
VÝNOS

13.5 MJ/kg
4 t/ha



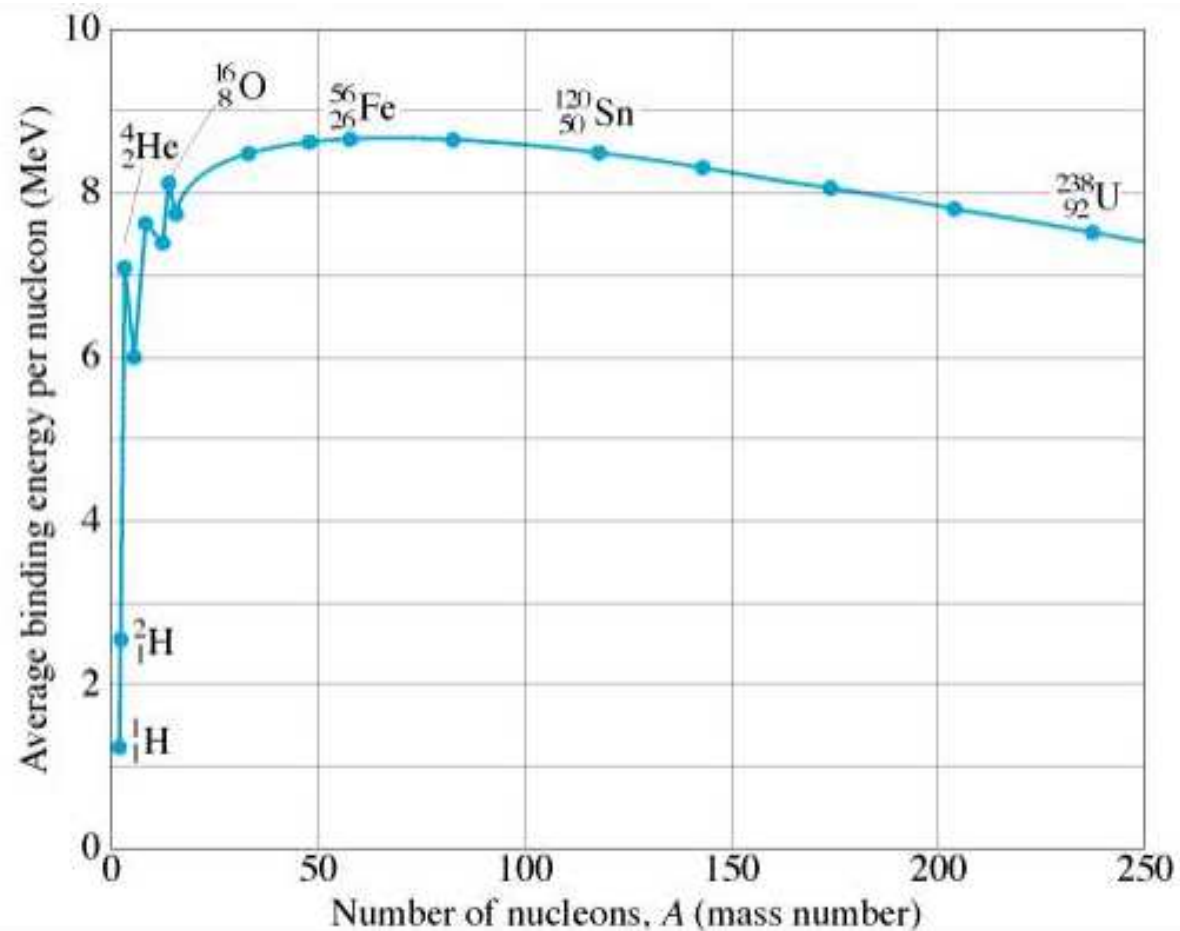
PRO VÝROBU 1 MWa \approx 32 TJ (VÝKON 1 MW)
POTŘEBUJEME 2370 t SLÁMY a TEDY 590 ha PŮDY

ENERGIE



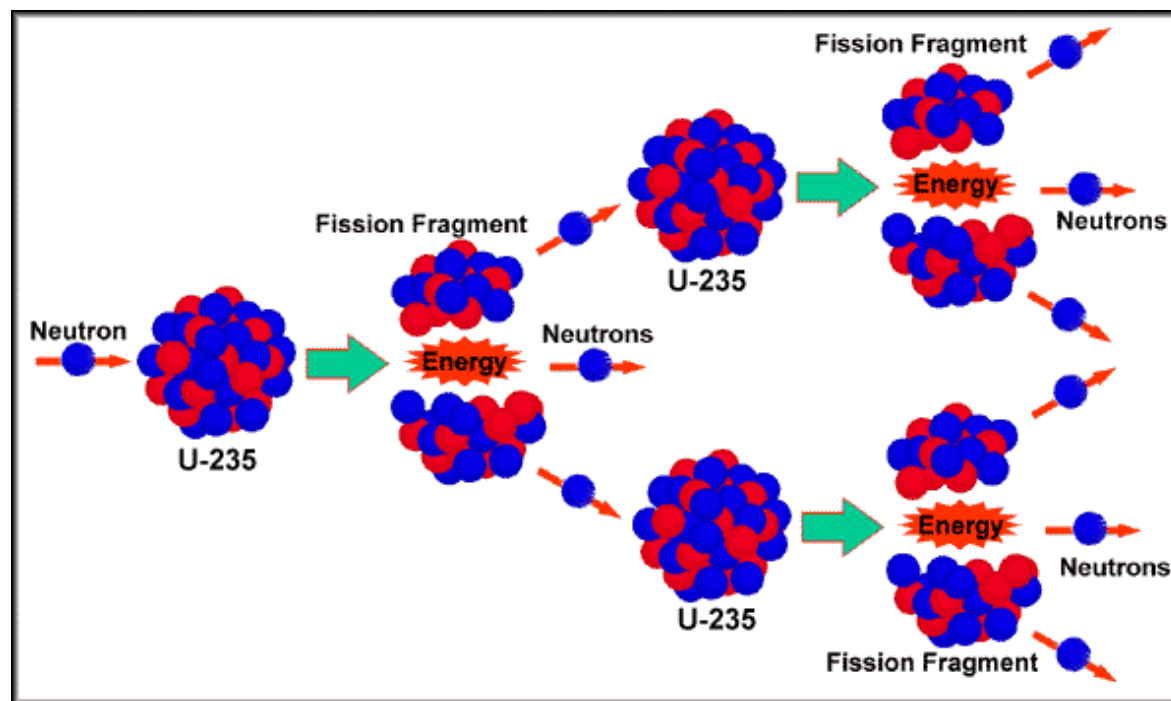
Z JÁDRA

FERMI – CHICAGO 2. 12. 1942, 15:20 MÍSTNÍHO ČASU



**VÝHODNÉ JE ŠTĚPENÍ TĚŽKÝCH
A SLUČOVÁNÍ LEHKÝCH JADER**

ŠTĚPENÍ



PŘI ŠTĚPENÍ URANU (PLUTONIA, THORIA) SE UVOLŇUJÍ 2–3 NEUTRONY, KTERÉ VYVOLAJÍ DALŠÍ ŠTĚPENÍ – DOCHÁZÍ K ŘETĚZOVÉ REAKCI

UVOLNÍ SE ENERGIE

$$Q = A\varepsilon - (A_1\varepsilon_1 + A_2\varepsilon_2) = A(\varepsilon - \varepsilon_s)$$

$$\approx 240 \times 0.8 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}$$

cca 160 MeV FRAGMENTY, 6 MeV NEUTRONY,
30 MeV OSTATNÍ (γ , e^- , ν)

VZNIKLÉ FRAGMENTY MAJÍ POMĚRY
NÁBOJŮ A HMOTNOSTÍ PŘIBLIŽNĚ 3 : 2

PODMÍNKA MOŽNOSTI ŠTĚPENÍ -
Z WEIZSÄCKEROVY FORMULE $\gamma Z^2/A^{1/3} > \beta A^{2/3}$,
tj. $Z^2/A > 17$

VE SKUTEČNOSTI – DÍKY ENERGETICKÉ
BARIÉŘE AŽ JÁDRA OD $A \approx 210$

ÚČINNÝ PRŮŘEZ σ

STŘEDNÍ POČET REAKCÍ ZA 1 ČASU
NA 1 REAKČNÍM CENTRU PŘI JEDNOTKOVÉM
TOKU DOPADAJÍCÍCH ČÁSTIC

$$\text{POČET REAKCÍ / ČAS} = N \cdot j \cdot \sigma$$

N = POČET REAKČNÍCH CENTER

j = TOK DOPADAJÍCÍCH ČÁSTIC

σ = ÚČINNÝ PRŮŘEZ

ÚČINNÝ PRŮŘEZ ZÁVISÍ NA ENERGII

ROZMĚR m^2

V JADERNÉ FYZICE V BARNECH: $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$

BILANCE NEUTRONŮ

EFEKTIVNÍ POČET NEUTRONŮ NA ZÁCHYT

$$\eta = \nu \cdot \sigma(n,f) / (\sigma(n,f) + \sigma(n,\gamma))$$

ν = POČET UVOLNĚNÝCH NEUTRONŮ

$\sigma(n,f)$ = ÚČINNÝ PRŮŘEZ ŠTĚPENÍ

$\sigma(n,\gamma)$ = ÚČINNÝ PRŮŘEZ RADIAČNÍHO
ZÁCHYTU

U 235

NEUTRONY S ENERGIÍ 2-3 MeV (RYCHLÉ)

$$\nu^5 = 2.65, \quad \sigma^5(n,f) = 2 \text{ b}, \quad \sigma^5(n,\gamma) = 0.2 \text{ b}$$

DÁ $\eta = 2.4$ NEUTRONŮ

JE TÉŽ ÚNIK NEUTRONŮ DO OKOLÍ

PRO DOSTATEČNĚ VELKÝ – KRITICKÝ – OBJEM
DOCHÁZÍ K SAMOVOLNÉMU ŠTĚPENÍ

PRO U235 JE KRITICKÝ OBJEM cca 2.5 l,
ODPOVÍDAJÍCÍ KRITICKÁ HMOTNOST JE cca 47 kg

U 238

$$\nu^8 = 2.5$$

JEN cca 60% NEUTRONŮ MÁ ENERGIÍ
DOSTATEČNOU PRO ŠTĚPENÍ (> 1.4 MeV)

Z NICH JEN cca KAŽDÝ PÁTÝ VYVOLÁ
ŠTĚPENÍ

$$\text{ODTUD } \eta^8 \approx 0.3$$

K SAMOVOLNÉMU ŠTĚPENÍ NEDOCHÁZÍ

**PŘIROZENÝ URAN =
99.3% U 238 + 0.7% U 235**

U 238 DÁ – viz výše - $\eta^8 \approx 0.3$

**U 235 DÁ $\eta^5 = 2.65 \times 2 / (2 + 0.2 + 140 \times 0.1) \approx 0.3$
($\sigma^8(n, \gamma) = 0.1$)**

CELKEM $\eta^{\text{nat}} = \eta^8 + \eta^5 \approx 0.6$

**ANI PŘIROZENÝ URAN SE SAMOVOLNĚ
NEŠTĚPÍ**

CHCEME-LI VYVOLAT ŠTĚPENÍ, MUSÍME
BUĎ

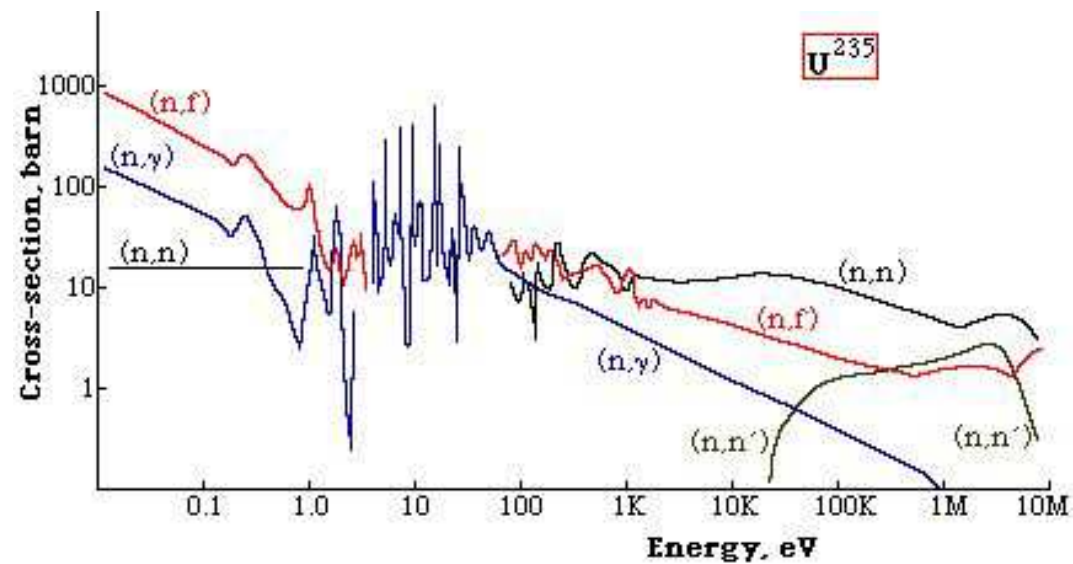
OBOHATIT PŘIROZENÝ URAN

(BUĎ URANEM 235 (ASPOŇ 7 %) NEBO
PLUTONIEM 239 (ASPOŇ 5 %)

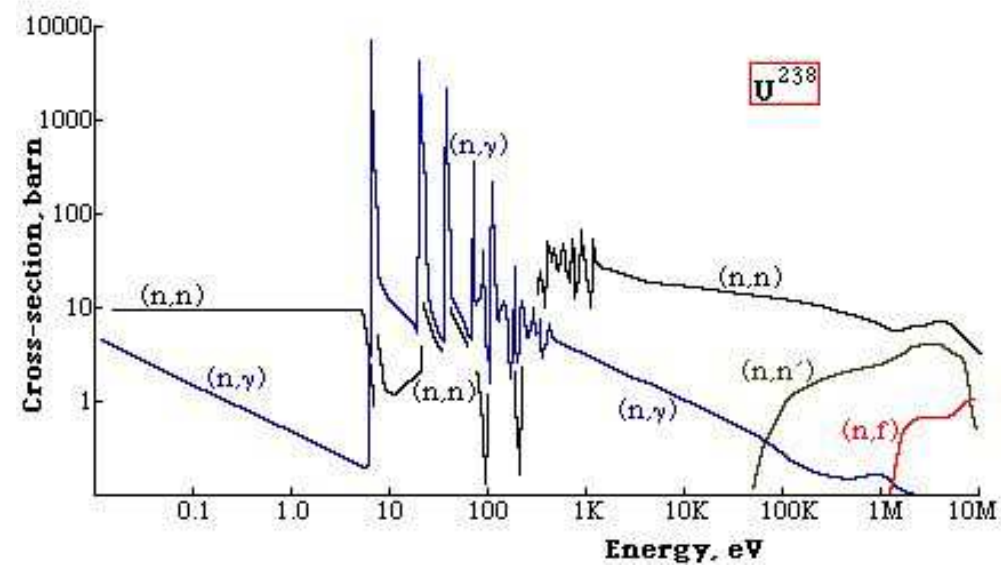
NEBO

ZPOMALIT NEUTRONY

DRUHÉ VEDE KE STANDARDNÍM REAKTORŮM,
PRVNÍ K REAKTORŮM MNOŽIVÝM



ÚČINNÉ
PRŮŘEZY
V ZÁVISLOSTI
NA ENERGII



MODEROVÁNÍ

SNÍŽENÍ ENERGIE NEUTRONŮ NA cca 0.05 eV

PAK $\nu^5 = 2.47$, $\sigma^5(n,f) = 580 \text{ b (!)}$,

$\sigma^5(n,\gamma) = 112 \text{ b}$, $\sigma^8(n,\gamma) = 2.8 \text{ b}$

A $\eta \approx 1.3$

JSOU OVŠEM ZTRÁTY NEUTRONŮ PŘI
MODEROVÁNÍ

VHODNĚ MODERÁTORY JSOU TĚŽKÁ VODA
($\sigma_{\text{abs}} = 1.1 \text{ mb}$) A GRAFIT ($\sigma_{\text{abs}} = 3.8 \text{ mb}$)
(LEHKÁ NEABSORBUJÍCÍ JÁDRA)

OBYČEJNÁ VODA ($\sigma_{\text{abs}} = 670 \text{ mb}$) VYŽADUJE
OBOHACENÍ (ASPOŇ 3 % U 235)

BILANCE NEUTRONŮ PRO REAKTOR S MODEROVÁNÍM

$$n(g+1) = k_{\infty} P_F P_T n(g)$$

$n(g)$ – počet neutronů v g -té generaci,
 k_{∞} - faktor zmnožení v nekonečném
reaktoru

$$k_{\infty} = \epsilon p f \eta$$

Čtyřfaktorová formule

ϵ – zvětšení počtu štěpných
neutronů díky ^{238}U

Typicky 1.02

p – pravděpodobnost nezachycení
neutronu moderátorem

0.87

f – pravděpodobnost zachycení
neutronu palivem

0.71

$\eta = v\sigma_f/\Sigma\sigma_a$ – počet neutronů na 1 štěpení

1.65

Celkem typicky $k_\infty = 1.02 \times 0.87 \times 0.71 \times 1.65 = 1.04$

Faktory P_F a P_T popisují vliv
konečných rozměrů reaktoru

$$P_F = \exp(-B_g^2 \tau)$$

únik rychlých 0.97

$$P_T = 1/(1 + L^2 B_g^2)$$

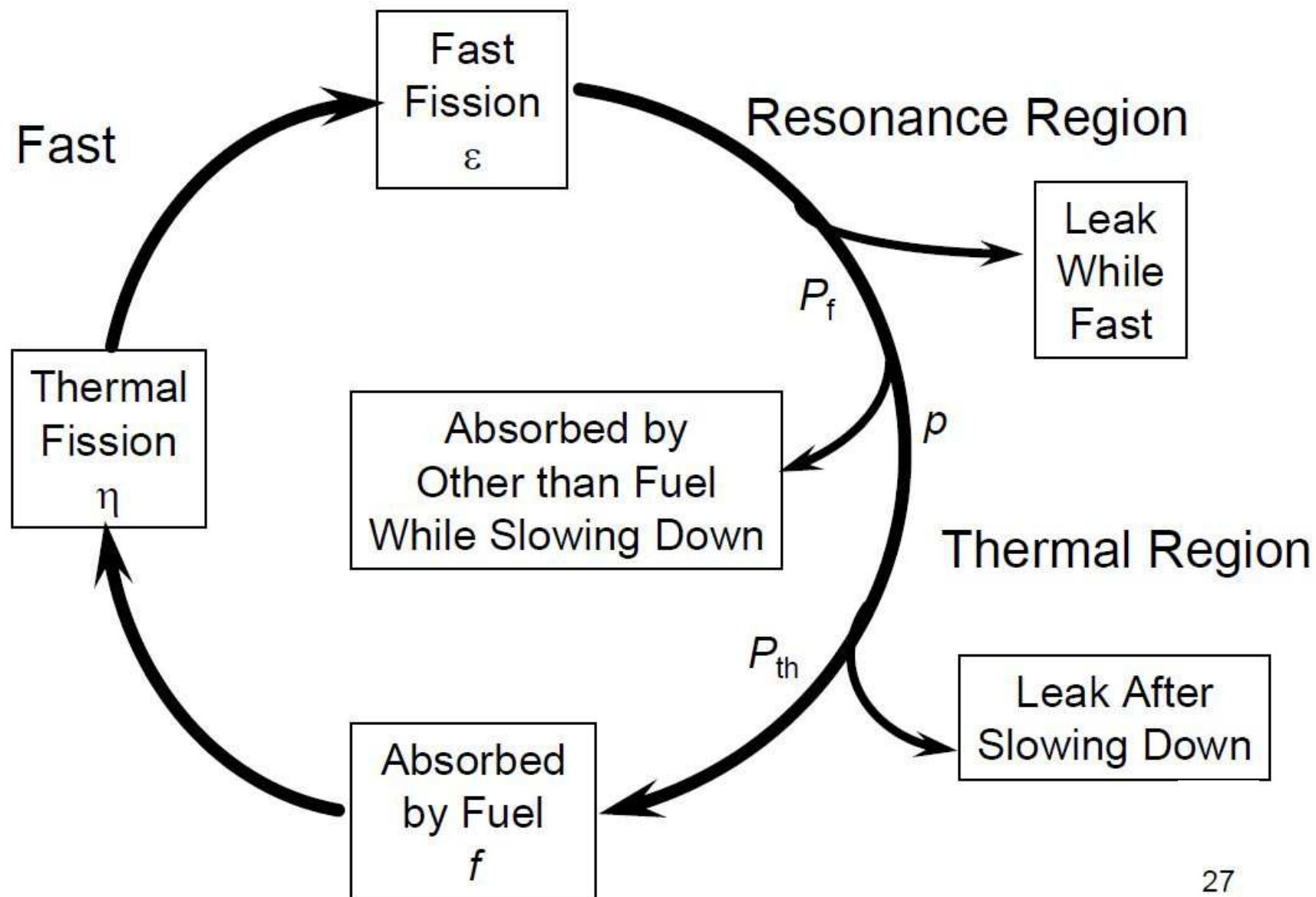
únik tepelných
neutronů 0.99

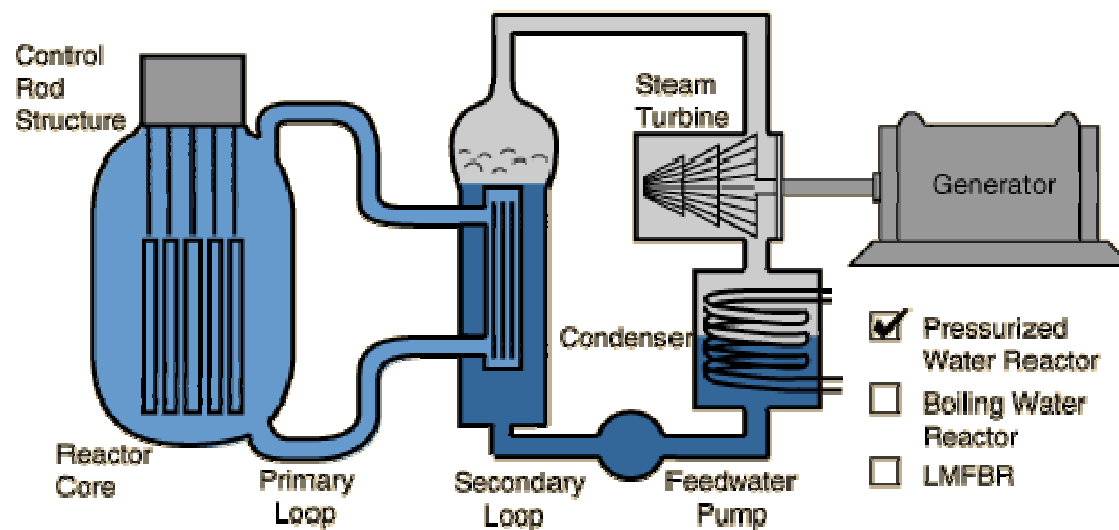
τ – Fermiho věk neutronů ($[m^2]$)

L – migrační délka

$B_g^2 = (\pi/H)^2 + (2.405/R)^2$ pro válec
geometrický parametr reaktoru

PALIVOVÝ CYKLUS



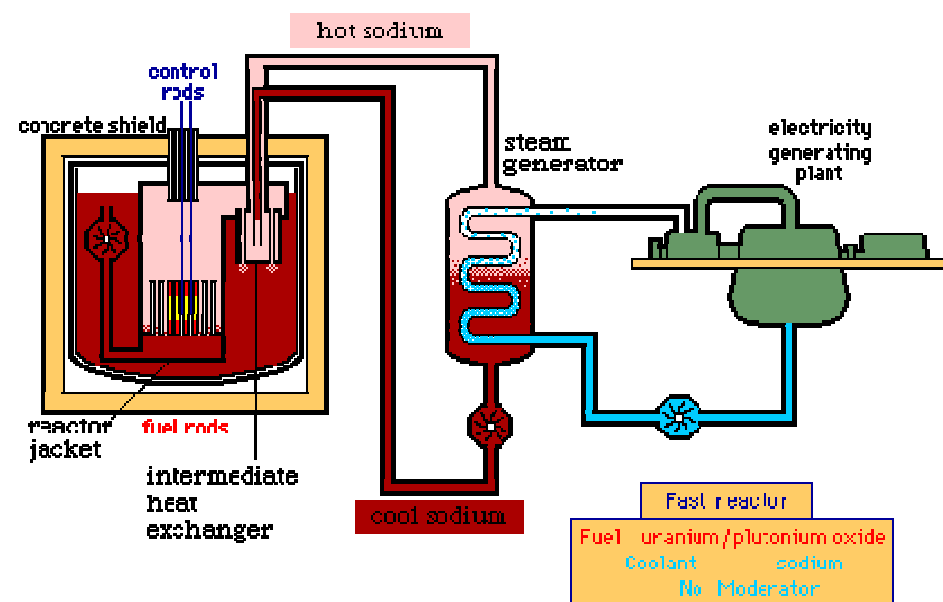


PWR

300°C, 15 MPa

BREEDER

ZMNOŽUJE PALIVO



SROVNÁNÍ ZDROJŮ

Roční vstupy a výstupy 1 000 MW elektrárny

Uhlí

2,500,000 t
250 vlaků
po 100 vagónech



10,950,000 t CO_2
219,000 t SO_2
29,000 t NO_2

Ropa

11,000,000
barrelů
(1 barrel = 159 l)
11 obřích
tankerů



Štěpení

28 t UO_2
1.5 vagónů



28 t vysoce
radioaktivního odpadu

**Sluneční
energie**

1 000 MW
sluneční
energie
20 km²
kolektorů



Fúze

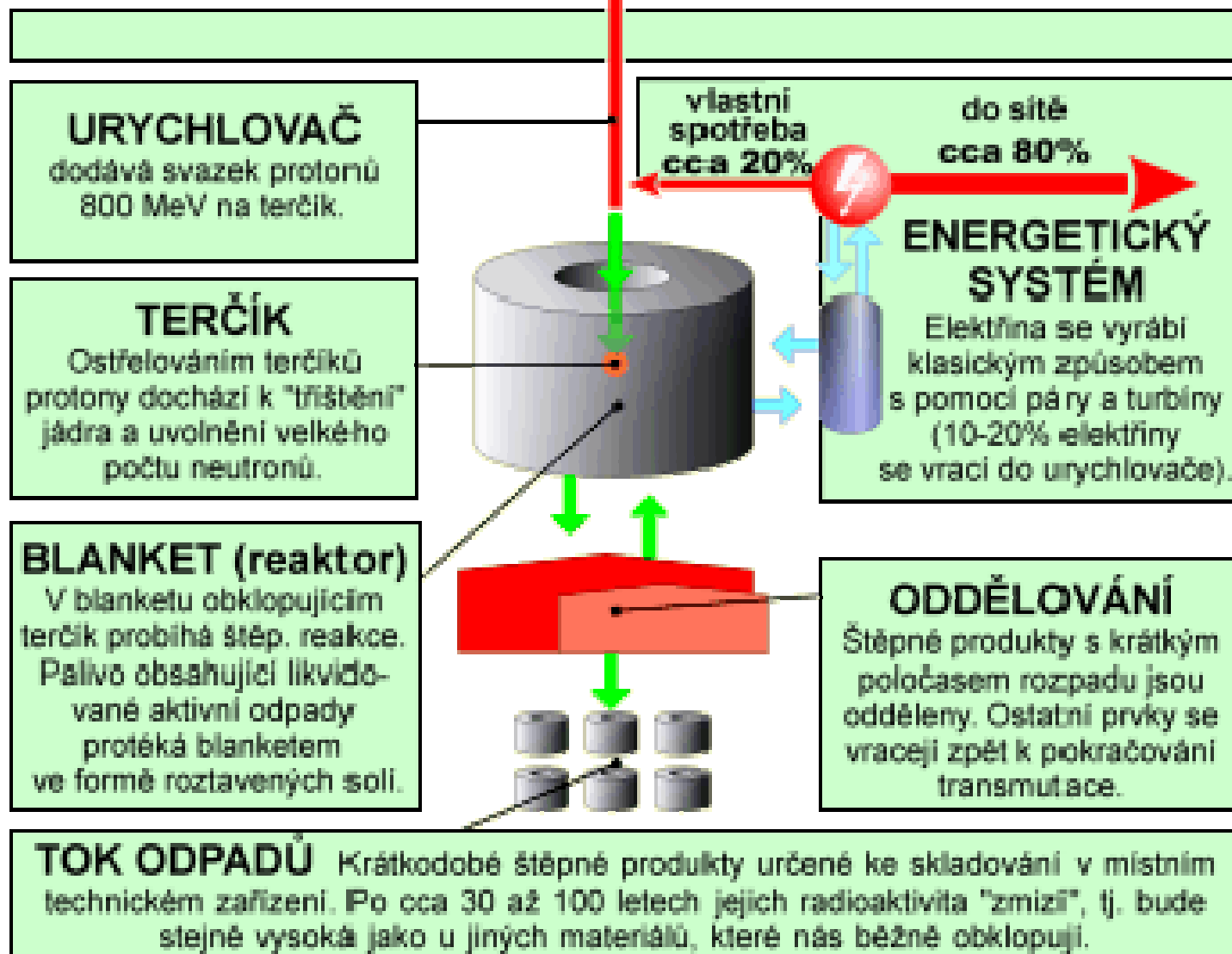
180 kg deuteria
270 kg tritia
1 nákladní auto



410 kg využitelného helia



ADTT





ЧОРНОБИЛЬ

АЭС им. ЛЕНИНА

**GRAFITEM
MODEROVANÝ,
VODOU CHLAZENÝ
REAKTOR**

**26. DUBNA 1986
1:23:58
MÍSTNÍHO ČASU**

**CO BYLO POTŘEBA K TOMU, ABY
BYL JADERNÝ REAKTOR PŘINUCEN
VYBUCHNOUT**

**ŠPATNÁ KONSTRUKCE ELEKTRÁRNY :
CITLIVÁ NA VZNIK BUBLIN, BEZ DVOU
STANDARDNÍCH OCHRAN (NÁDOBA, OBÁLKA),
S ODPOJITELNÝM BEZPEČNOSTNÍM ZAŘÍZENÍM
A ŠPATNĚ KONSTRUOVANÝMI ŘÍDÍCÍMI TYČEMI**

**NEKVALIFIKOVANÝ PERSONÁL :
ŘEDITEL, OSÁDKA ELEKTROINŽENÝRŮ**

EXPERIMENT

**VYSTAČÍ DOBĚH TURBÍN JAKO ZDROJ ENERGIE,
NEŽ SE NASTARTUJÍ DIESEL-AGREGÁTY ?**

PRŮBĚH : 14 H - SNÍŽENÍ VÝKONU REAKTORU, VYPNUTÍ HAVARIJNÍHO CHLAZENÍ (!), ODKLAD TESTU,
23 H - RYCHLEJŠÍ POKRAČOVÁNÍ → PŘÍLIŠNÉ SNÍŽENÍ VÝKONU (AŽ NA 30 MW MÍSTO 700 MW !) → VYSUNUTÍ REGULAČNÍCH TYČÍ (!) (200 MW), ZAPNUTÍ ČERPACÍ PUMPY → TLAK A TEPLOTA MIMO POVOLENÉ MEZE → ZABLOKOVÁNÍ HAVARIJNÍCH SIGNÁLŮ (!), DALŠÍ POKLES VÝKONU → DALŠÍ TYČE VYTAŽENY RUČNĚ (!), SNÍŽENÍ NAPÁJENÍ VODOU → PÁRA, HLÁŠENÍ O MÁLO TYČÍCH
ZAHÁJENÍ TESTU (!) - ODPOJENÍ REAKTORU A HAVARIJNÍHO SYSTÉMU 2. TURBÍNY (!), PO 36 s „NĚCO“ V NEPOŘÁDKU - POKUS O RUČNÍ VYPNUTÍ REAKTORU – TYČE SE ZABLOKUJÍ. 2 VÝBUCHY

DŮSLEDKY

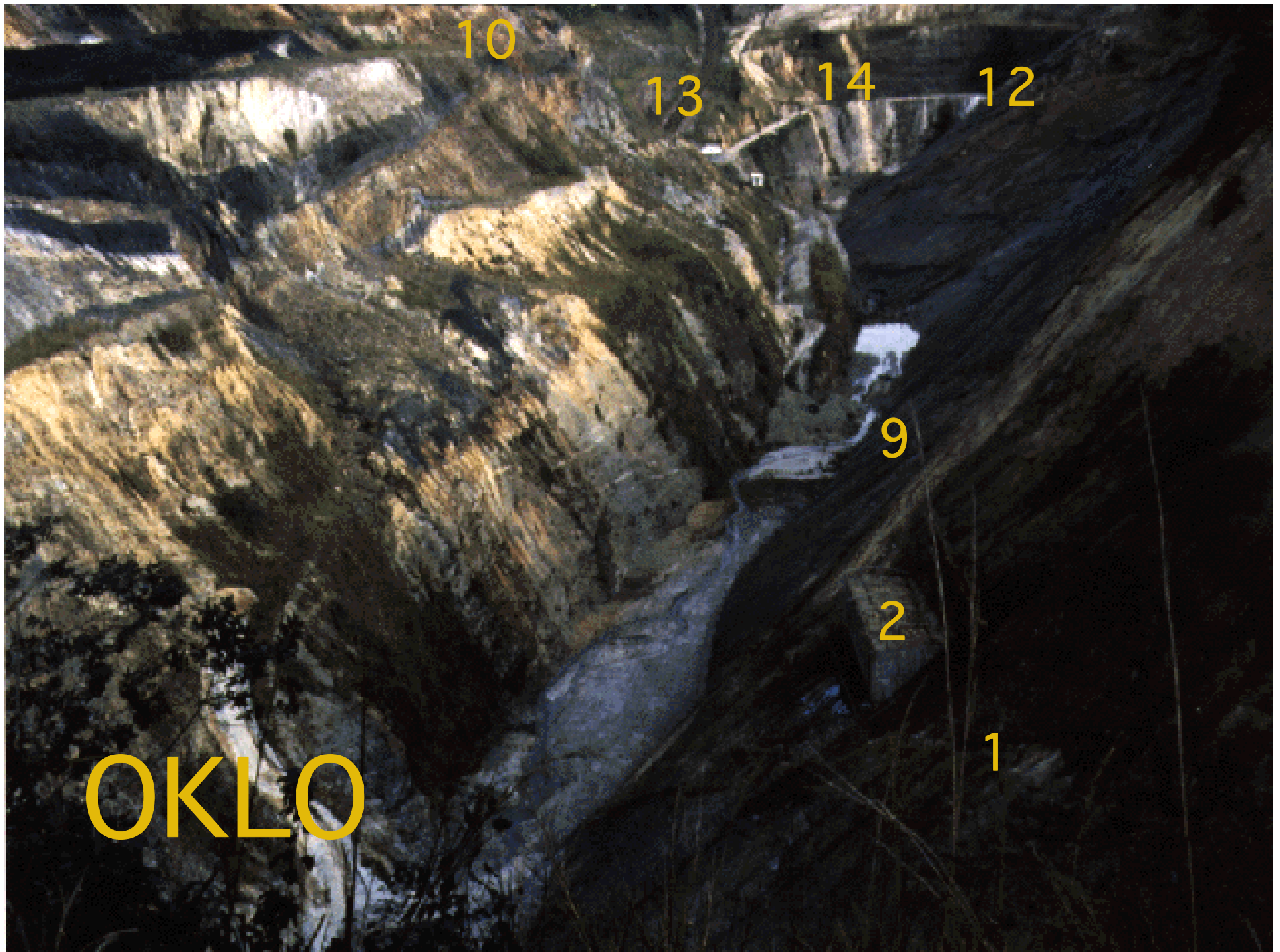
5 MLN OSOB OZÁŘENO, Z TOHO 135 TISÍC
VÝZNAMNĚJI

PŘEDPOKLÁDANÁ ÚMRTÍ : 4000 OSOB
(3 % VÝZNAMNĚJI OZÁŘENÉ POPULACE –
„PŘIROZENÁ RAKOVINA“ cca 25 %)

JIŽ ZEMŘELO 56 OSOB (47 ČLENŮ OSÁDKY
A ZÁCHRANÁŘŮ + 9 DĚTÍ – RAKOVINA
ŠTÍTNÉ ŽLÁZY)

UVOLNILO SE 5-12 EBq RADIOAKTIVITY
(MÉNĚ NEŽ 1 % JADERNÝCH ZKOUŠEK)

MÉNĚ NEŽ UVÁDĚNO !



OKLO

ŘEKA V GABUNU U NÍŽ JSOU URANOVÉ DOLY

OD ROKU 1972 ZDE BYLO IDENTIFIKOVÁNO
16 VYHOŘELÝCH PREHISTORICKÝCH REAKTORŮ
(Z DOBY PŘED cca 1.8 MLD LET

REAKTORY PRACOVALY S OBOHACENÝM
URANEM A BYLY MODEROVÁNY VODOU

SYSTÉM FUNGOVAL VÍCE NEŽ 150 TIS. LET
S PRŮMĚRNÝM VÝKONEM cca 100 KW

REGULACE : VYPAŘOVÁNÍ VODY
(0.5 + 2.5 H CYKL)



REAKTOR VODOU MODEROVANÝ S OBOHACENÝM URANEM ?

VODA Z ŘEKY,
URAN V RUDNÝCH ČOČKÁCH O PRŮMĚRU cca
10 – 20 m a TLOUŠTČE cca 1 m,
OBOHACENÝ ?

U238 MÁ POLOČAS ROZPADU 4.5 MLD LET,
U235 JEN 0.7 MLD LET → DŘÍVE BYL RELATIVNÍ
PODÍL U235 VĚTŠÍ

$$p(-t) = p_0 \exp(t/T_5) / (p_0 \exp(t/T_5) + (1-p_0) \exp(t/T_8))$$

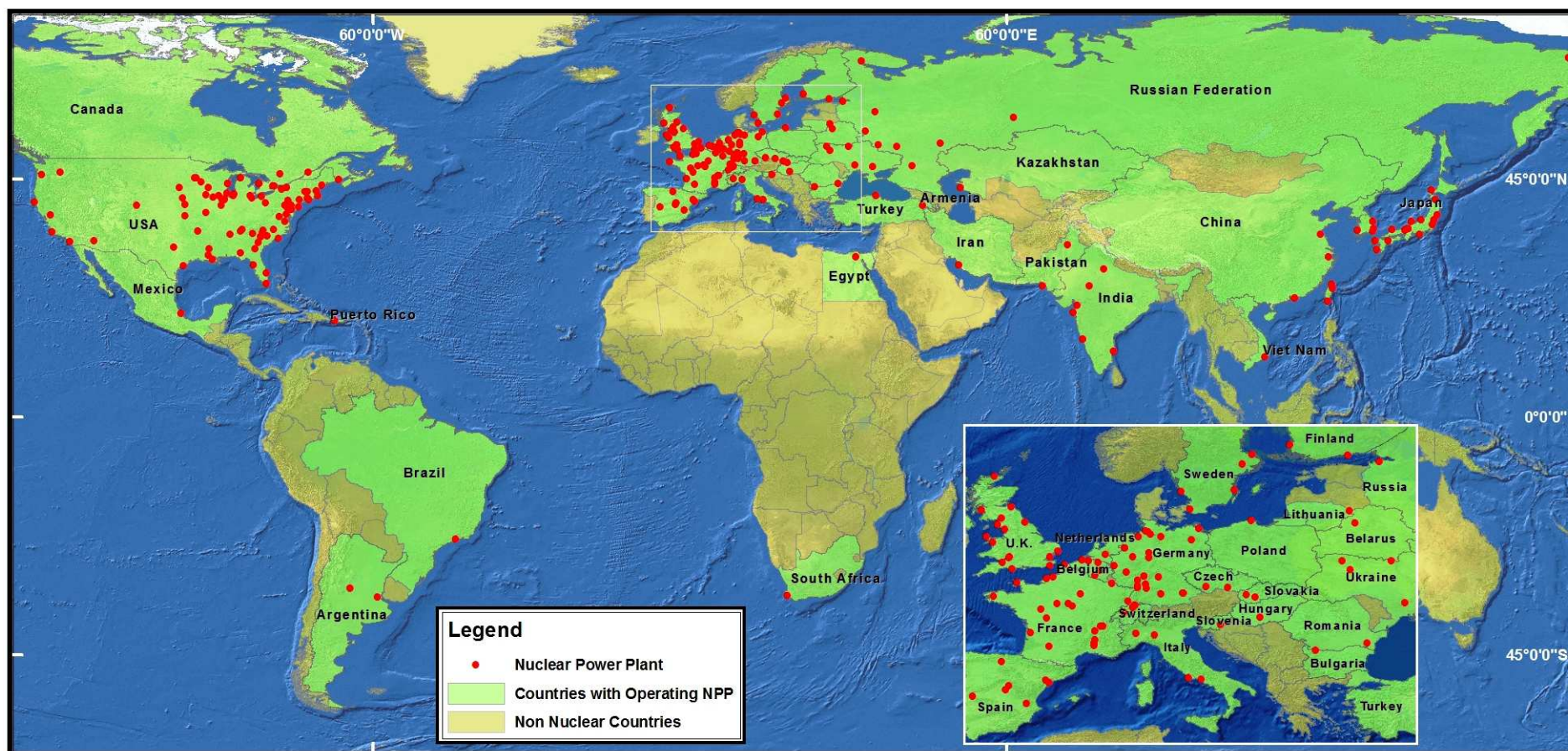
$$P_0 = 0.7 \% \rightarrow p(-1.8 \text{ MLD LET}) = 5.8 \% !$$

DŮSLEDKY

PŘED 2 MLD LET PLATILA STEJNÁ FYZIKA
JAKO DNES

RADIOAKTIVNÍ ODPAD (KROMĚ Kr) LZE
UDRŽET NA JEDNOM MÍSTĚ SKORO 2 MLD LET

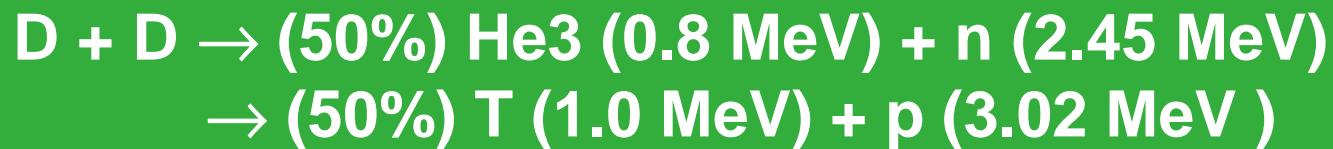
TAKOVÝCH REAKTORŮ BYLO ZŘEJMĚ VÍCE
+ V UVEDENÉ DOBĚ SE OBJEVILY PRVNÍ
EUKARYONTY (BUŇKY S JÁDREM)
= NÁHODA ?



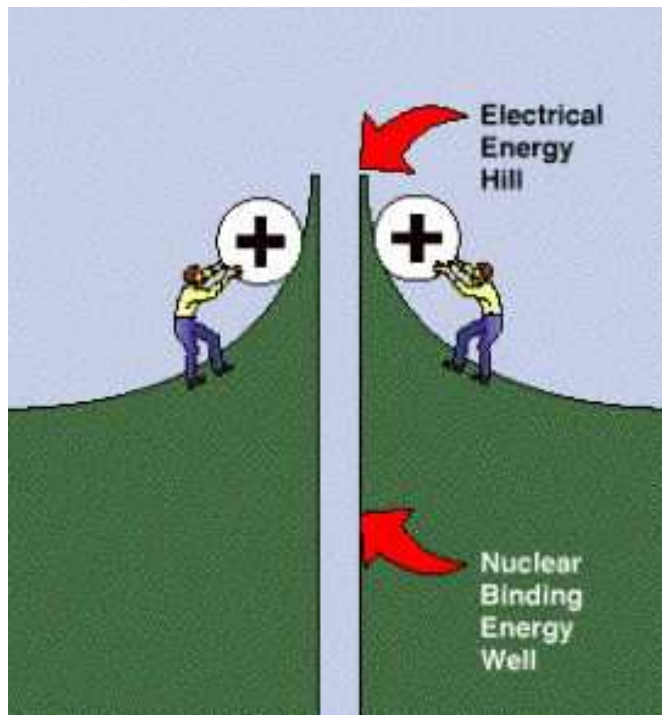
**ROZMÍSTĚNÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN
2011 (440 BLOKŮ)**

FÚZE

DOBRÉ REAKCE :



PROBLÉM : ODPUZOVÁNÍ

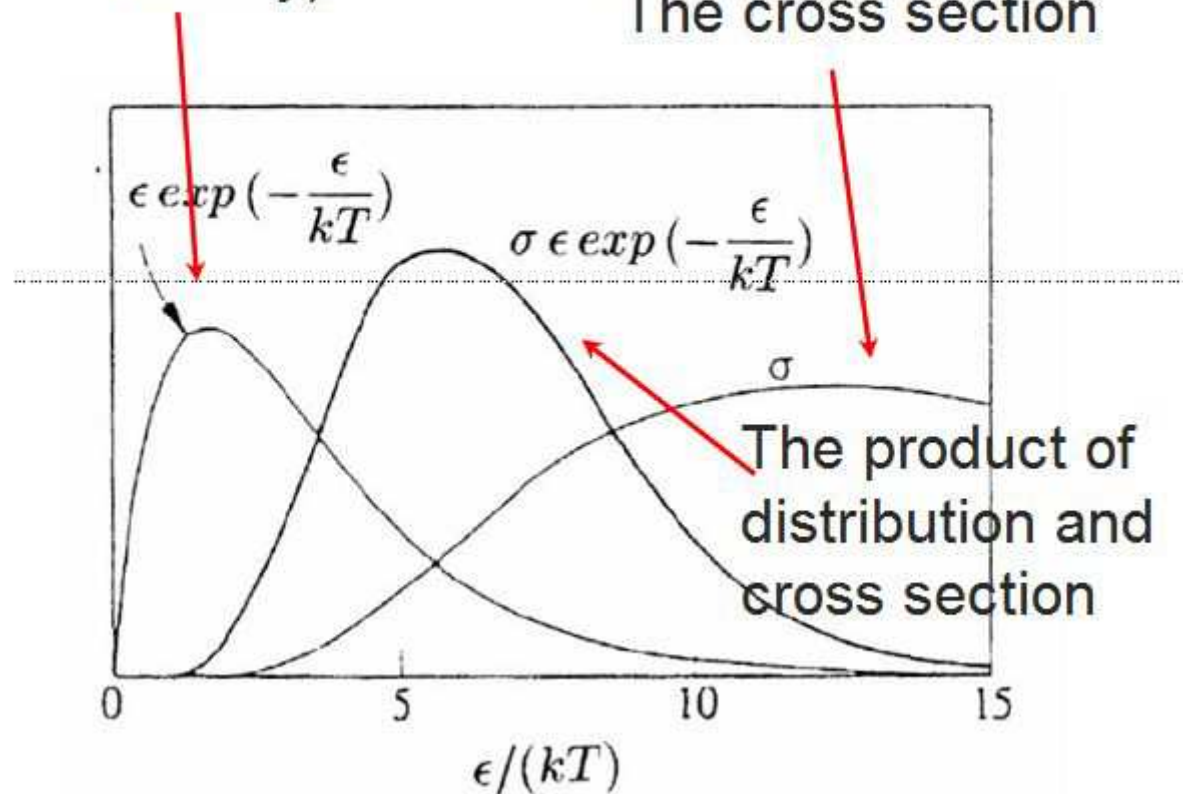


POTŘEBNÁ ENERGIE
 $E = e^2/4\pi\epsilon_0 R \approx 360 \text{ keV}$
 $\approx 4 \text{ MLD K}$

POMOHOU :
RYCHLÉ ČÁSTICE
TUNELOVÝ JEV

The Maxwellian (multiplied by the velocity)

The cross section



**PRO MOŽNOST ŠTĚPENÍ JE
DŮLEŽITÁ REAKČNÍ RYCHLOST $\langle \sigma v \rangle$**

PODMÍNKA UDRŽENÍ - LAWSON

DOBA UDRŽENÍ τ ZE VZTAHU $P_{\text{out}} = E / \tau$

ZÍSKANÁ ENERGIE $n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{\text{ch}} = 1/4 n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_{\text{ch}}$

PRO DT (resp. $1/2 n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_{\text{ch}}$ PRO DD)

E_{ch} = ENERGIE NABITÝCH ČÁSTIC

PŘI TEPLITĚ T JE ENERGIE PLAZMATU

$$E = 2 \times 3/2 n_e k_B T$$

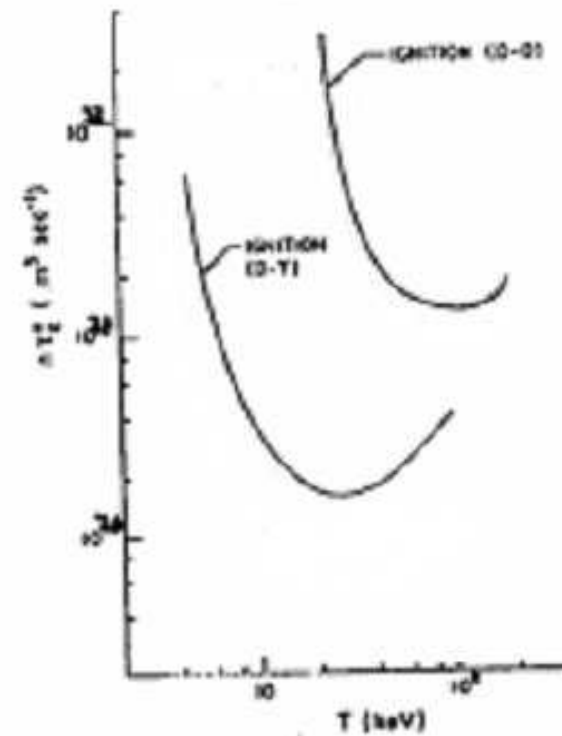
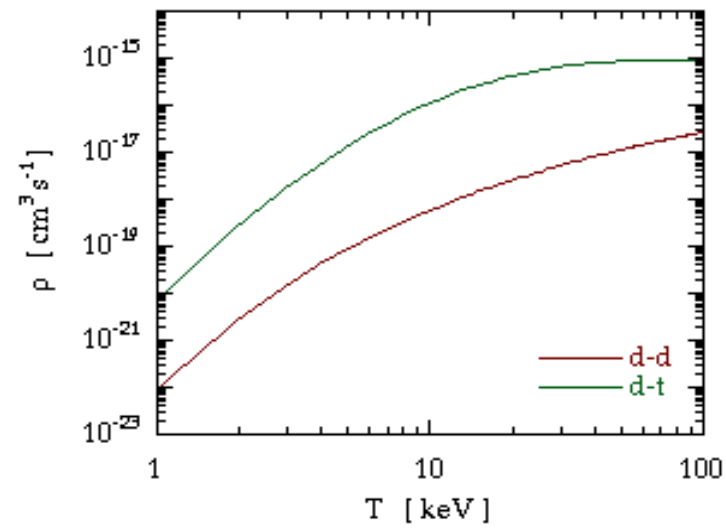
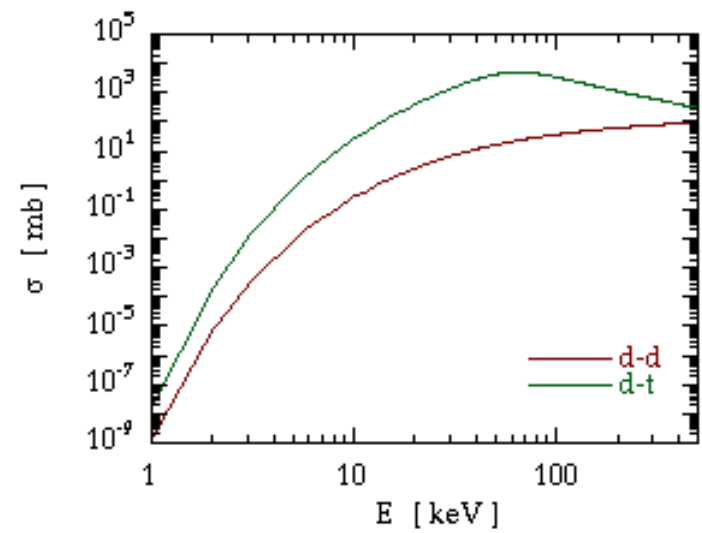
PODMÍNKA : ZÍSKANÁ ENERGIE > ZTRÁTY

$$1/4 n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_{\text{ch}} > 3 n_e k_B T / \tau \quad \text{DÁ}$$

$$n_e \tau > 12 k_B T / \langle \sigma v \rangle E_{\text{ch}}$$

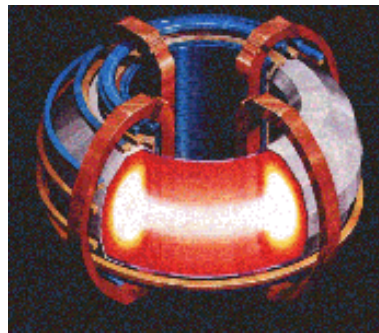
PRO DT $n_e \tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{s}$ PŘI 300 MLN K

PRO DD $n_e \tau > 10^{22} \text{ m}^{-3} \text{s}$ PŘI 1 MLD K



σ , $\langle \sigma v \rangle$, L

3 METODY UDRŽENÍ

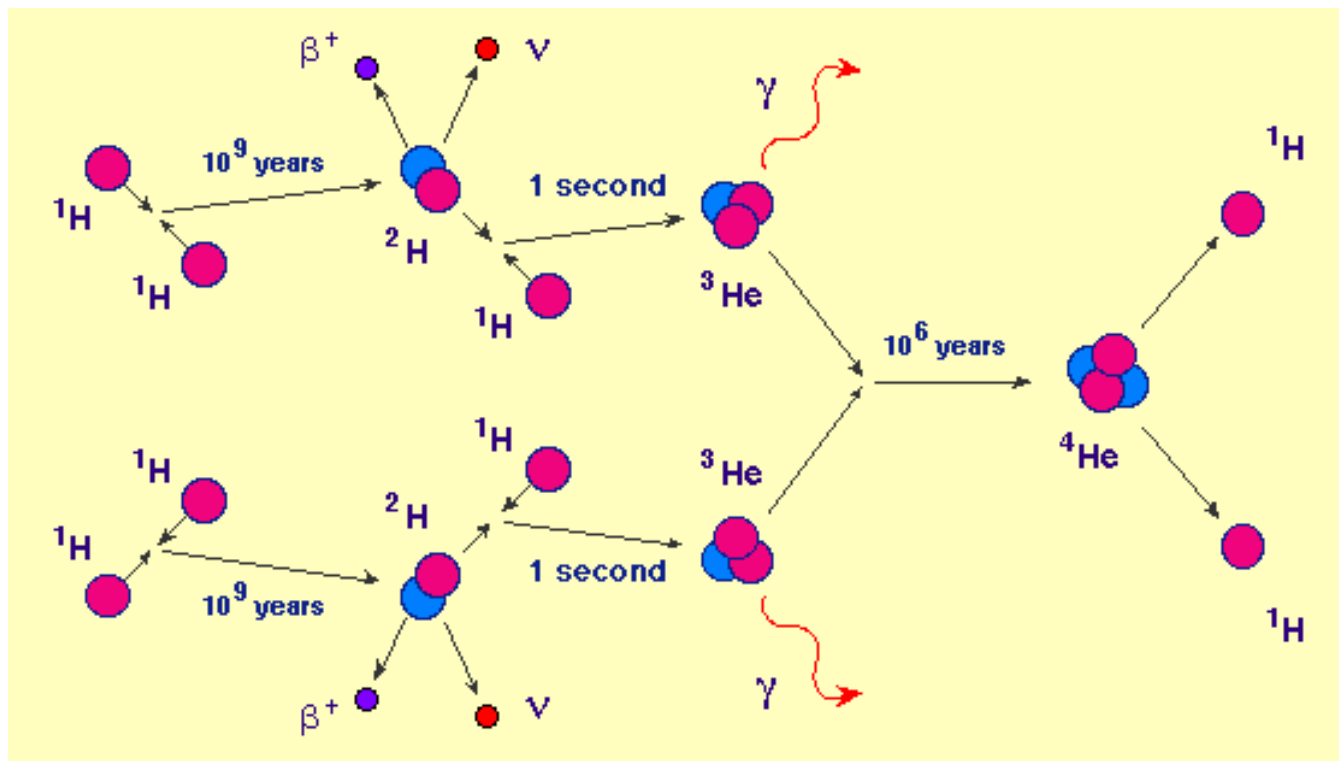


GRAVITAČNĚ - UMĚJÍ HVĚZDY

V MAGNETICKÉM POLI - obvykle TOKAMAKY

INERCIÁLNĚ S OHŘÁTÍM – obvykle LASERY

HVĚZDY SLUNEČNÍHO TYPU



pp-CYKLUS

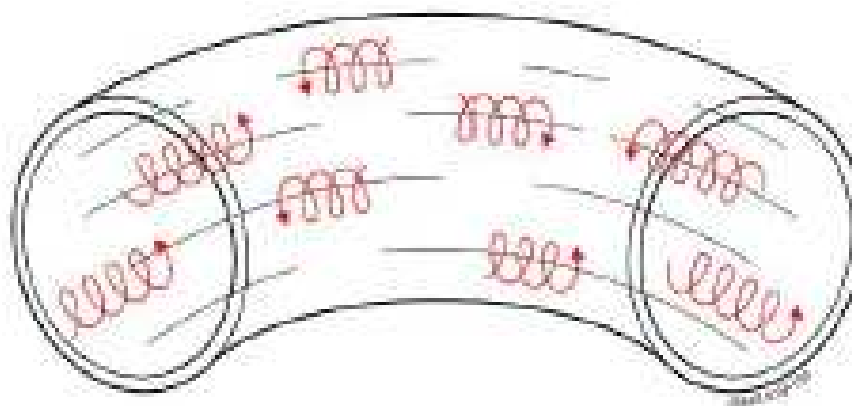
$0.08 M_{\odot} < M < 1.1 M_{\odot}$

TOKAMAK

TAMM, SACHAROV
≈ 1950

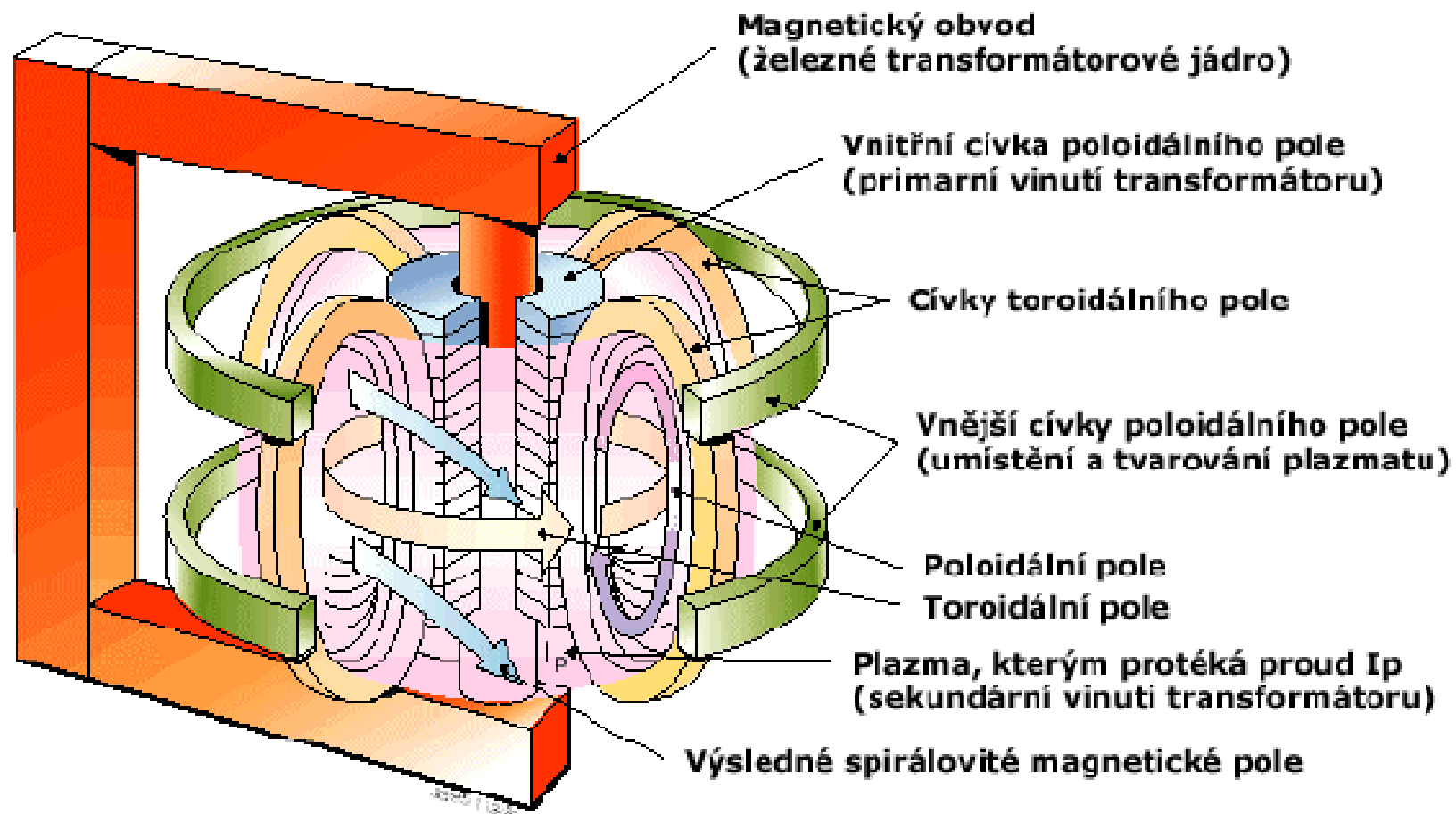
PLAZMA V MAGNETICKÉM POLI STABILIZACE PROTÉKAJÍCÍM PROUDEM

PRINCIP :



$n \approx 10^{20}-10^{21} \text{ m}^{-3}$ ($10^{-5}-10^{-4}$ VZDUCHU)
 $\tau \approx 1-10 \text{ s}$

SCHÉMA TOKAMAKU



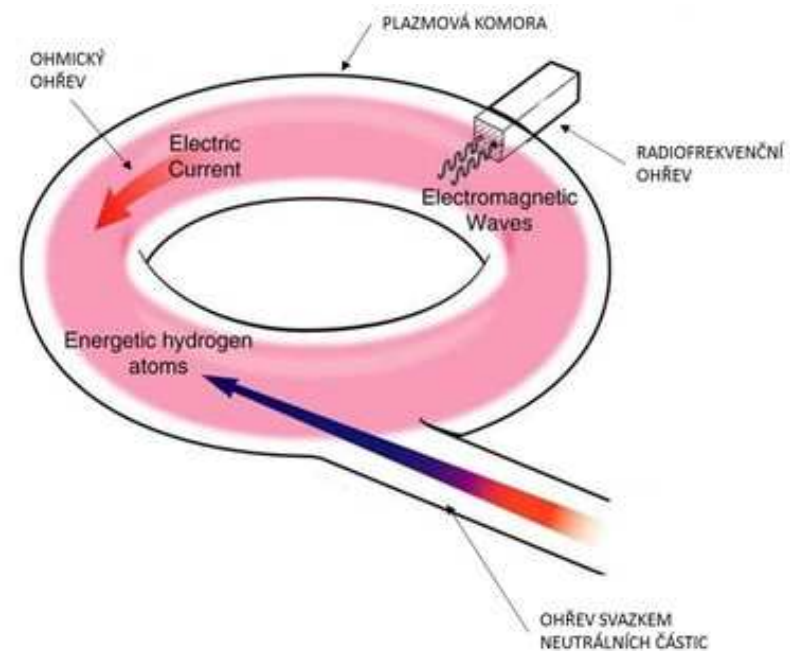
OHŘEV

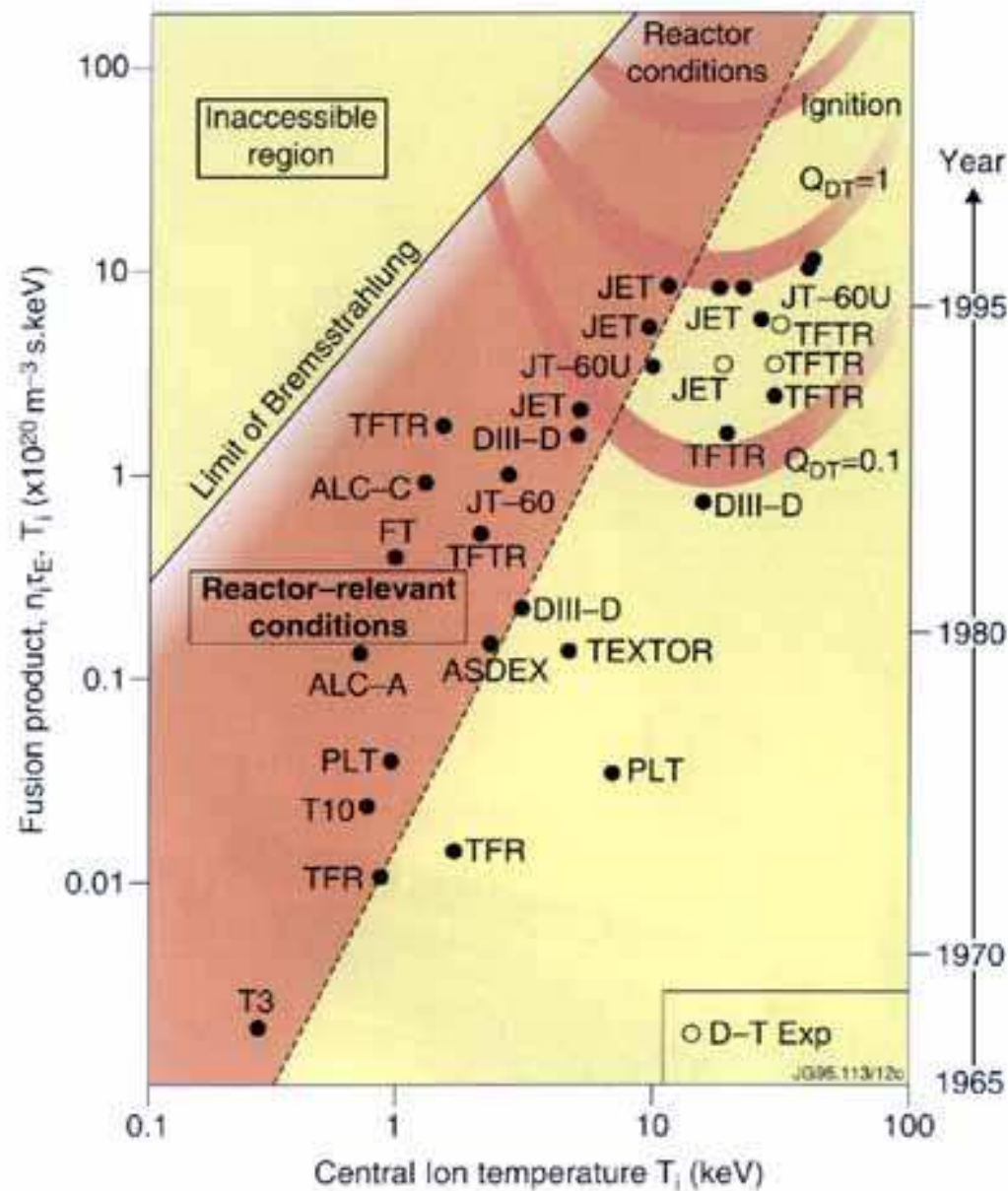
OHMICKÝ OHŘEV
(NESTAČÍ : ODPOR KLESÁ
S TEPLOTOU)

NEUTRÁLNÍ SVAZKY
(NEUTRALIZOVANÉ
URYCHLENÉ IONTY H)

**RADIOFREKVENČNÍ
OHŘEV(25-55 MHz)**

VLASTNÍ OHŘEV PŘI FÚZI

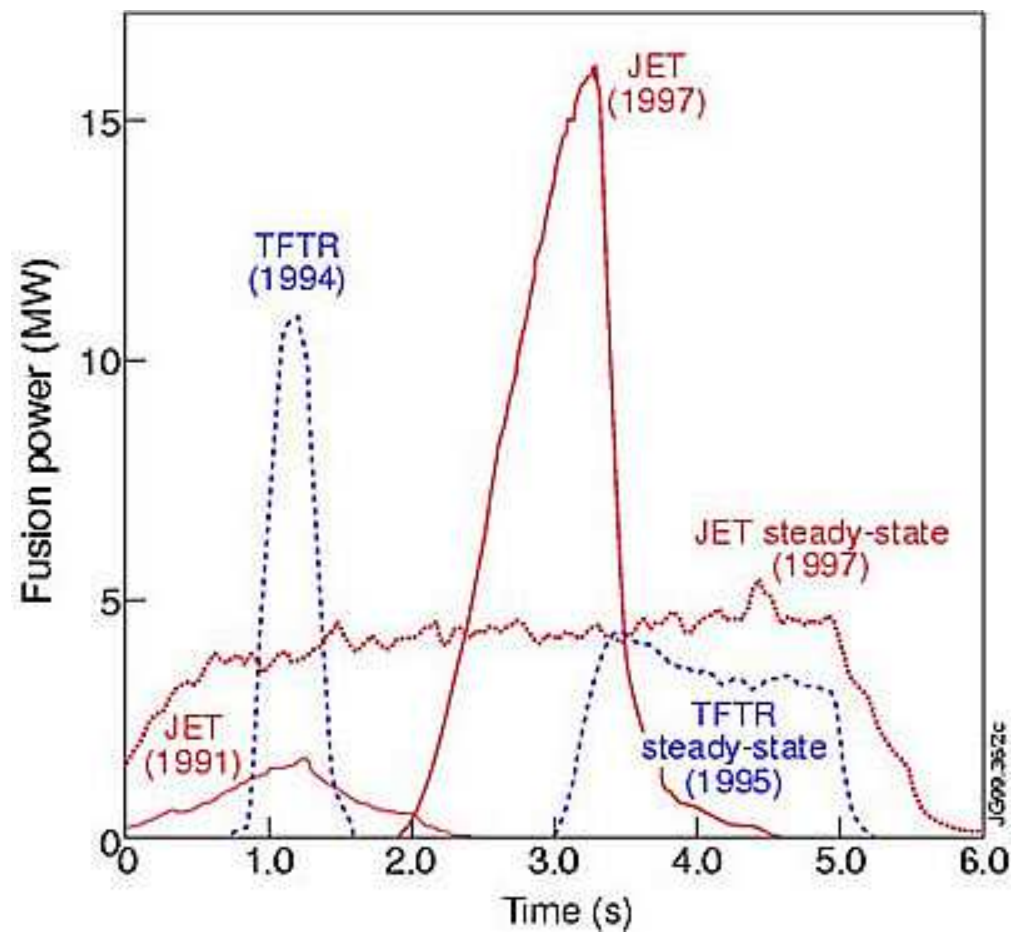




← VÝSLEDKY

REKORD :
JET 1997

DT PLAZMA
UVOLNĚNO 14 MJ
VÝKON 13 MW
 $Q = E_{\text{out}} / E_{\text{in}} = 0.6$

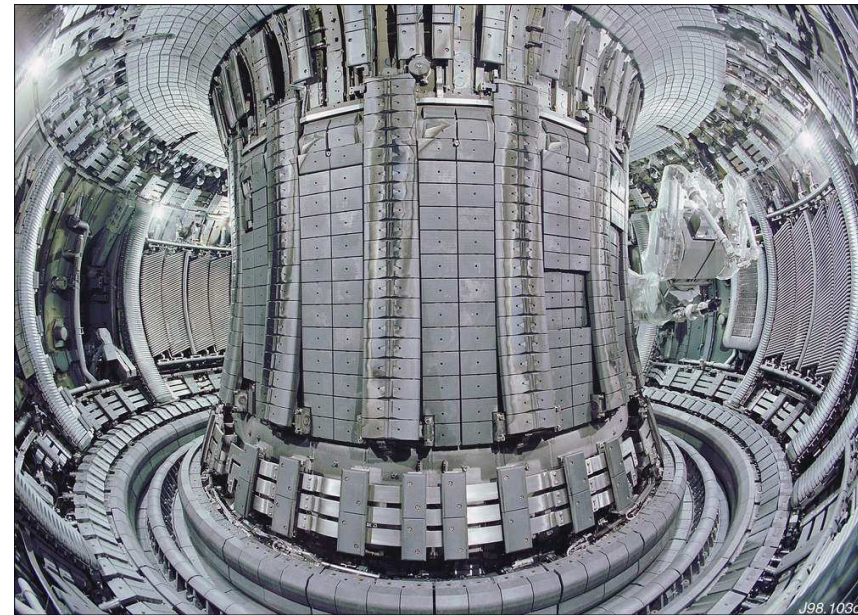
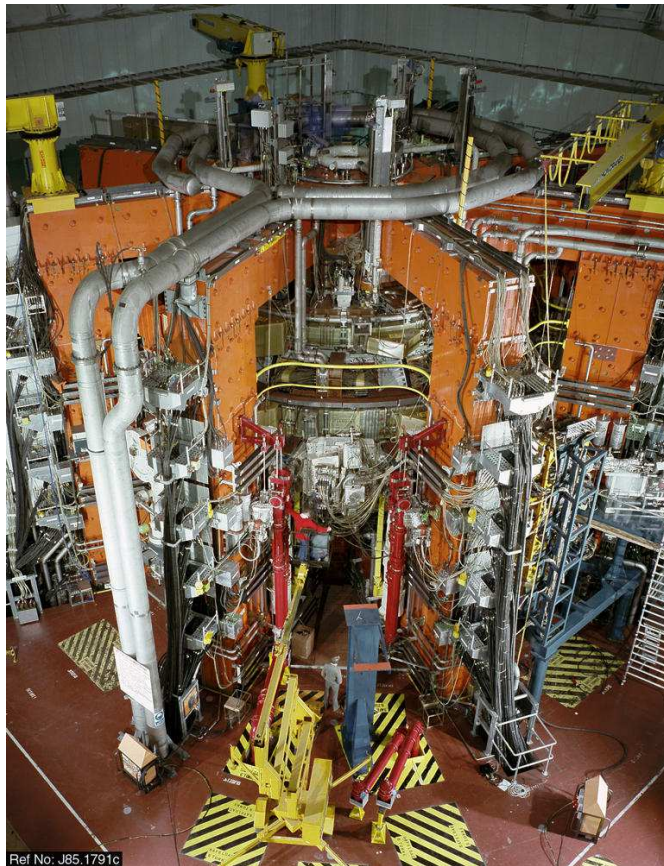


REKORDNÍ ZÁZNAM

Další DT pokus snad letos

NEJVĚTŠÍ SOUČASNÝ TOKAMAK

JET = JOINT EUROPEAN TORUS

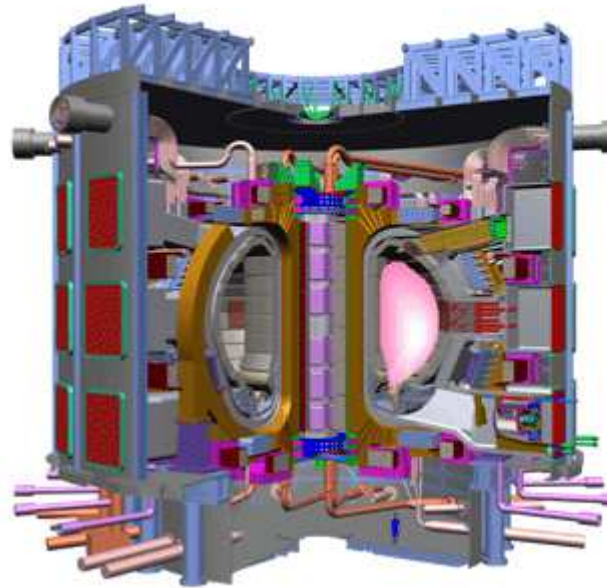


JE UMÍSTĚN
V OXFORDSHIRU, UK

DALŠÍ KROK JE ITER

ITER

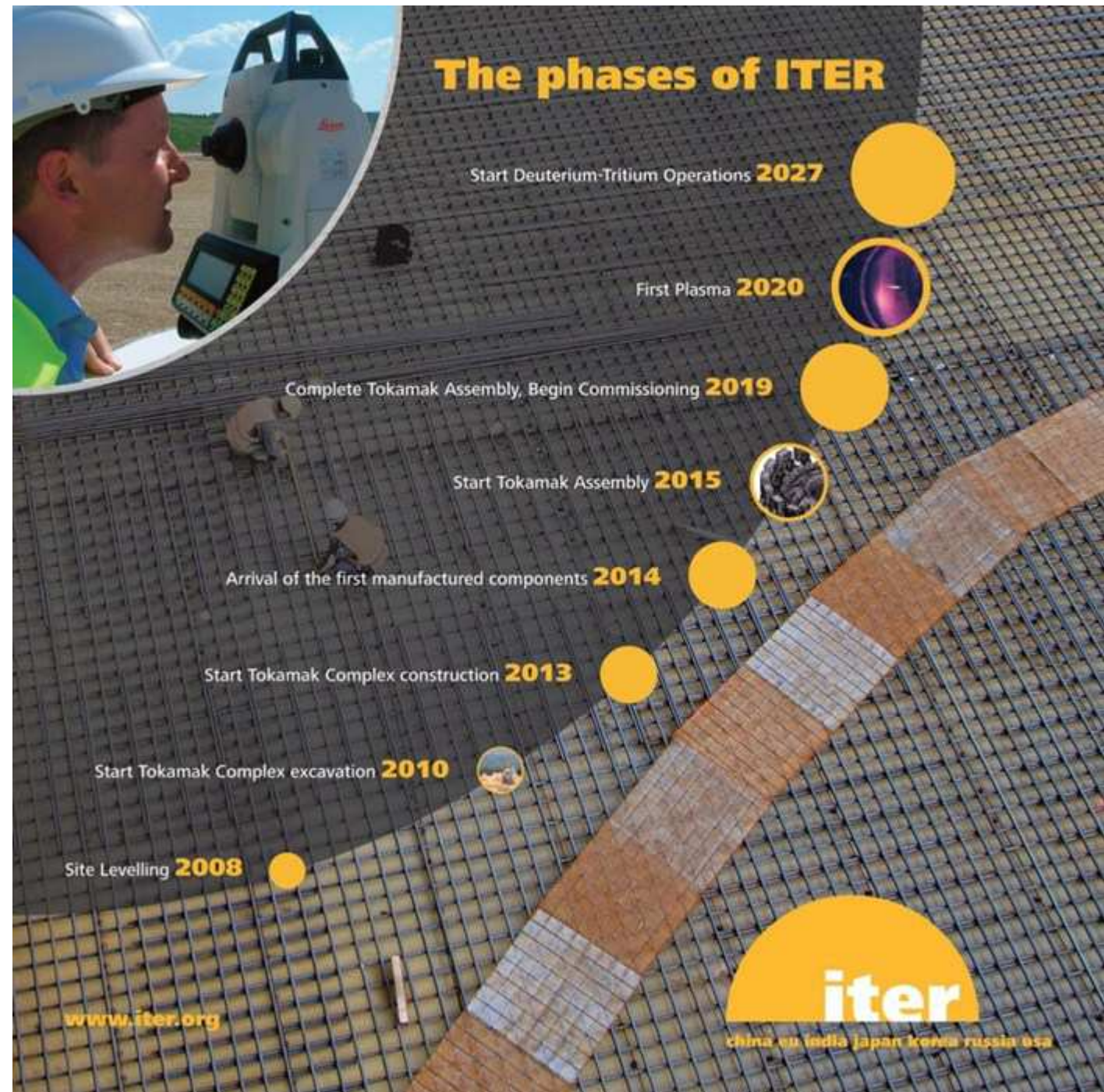
JET (to scale)



PARAMETRY TOKAMAKŮ JET A ITER

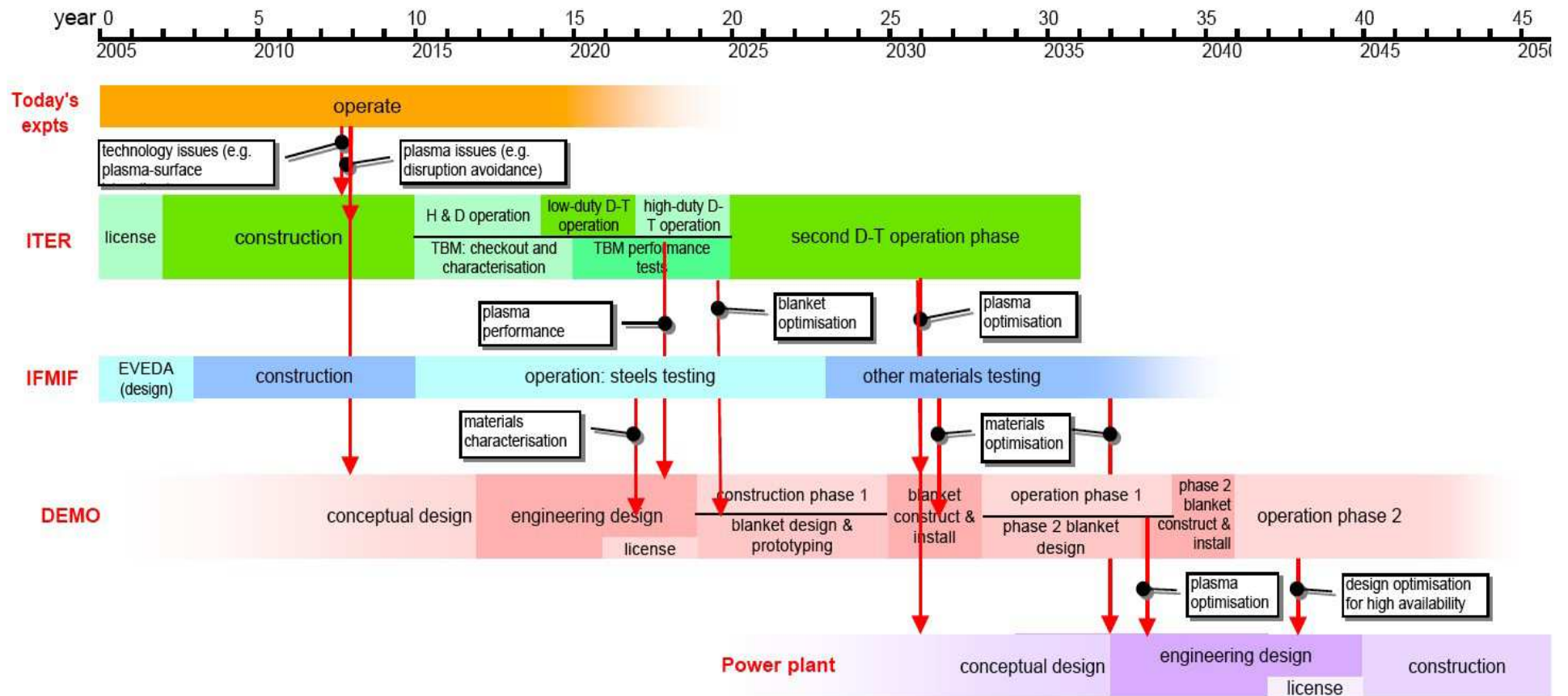
HLAVNÍ POLOMĚR [m]	3	6.2
VEDLEJŠÍ POLOMĚR [m]	1.25	2
OBJEM [m ³]	155	837
PROUD [MA]	5-7	15
MAGNETICKÉ POLE [T]	3.4	5.3
TRVÁNÍ PULZU [s]	10	> 300
TERMONUKL. VÝKON [MW]	10	500
Q = TNV/PŘÍKON	1	> 10
ENERGIE NEUTRONŮ [kW/m ²]	60	600

PLÁN PRO ITER



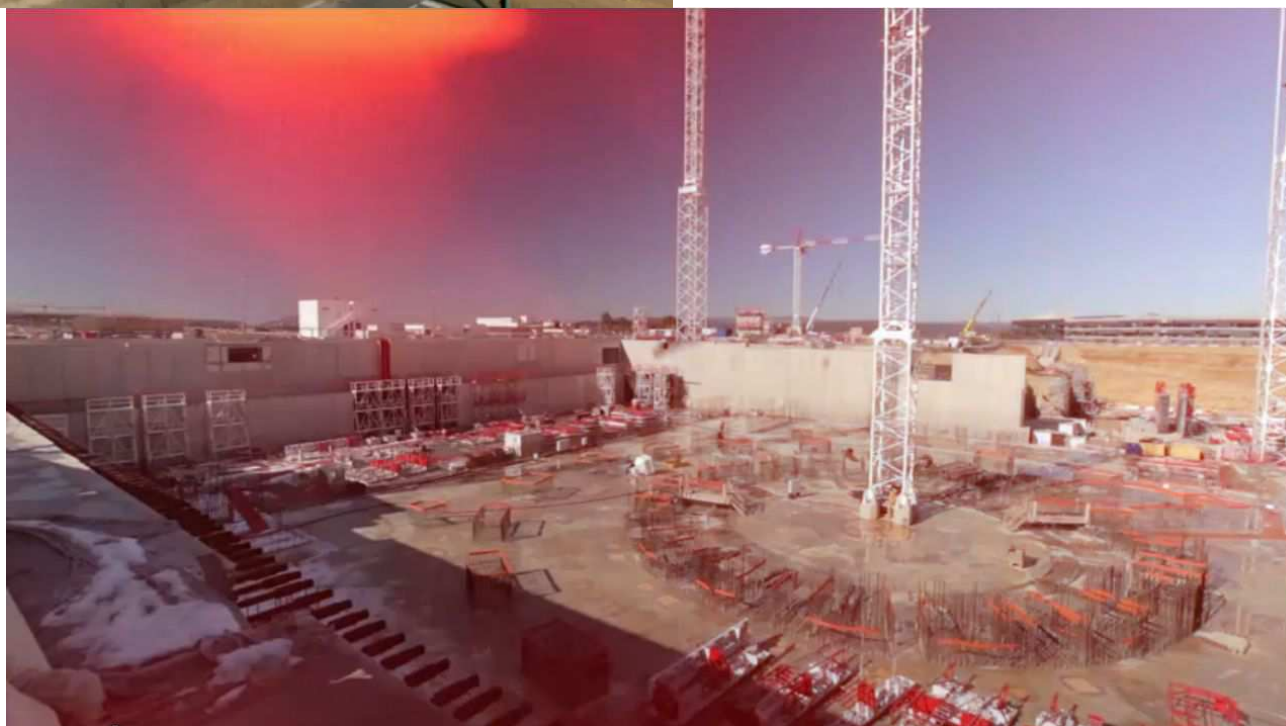
PODROBNĚJI

PRELIMINARY

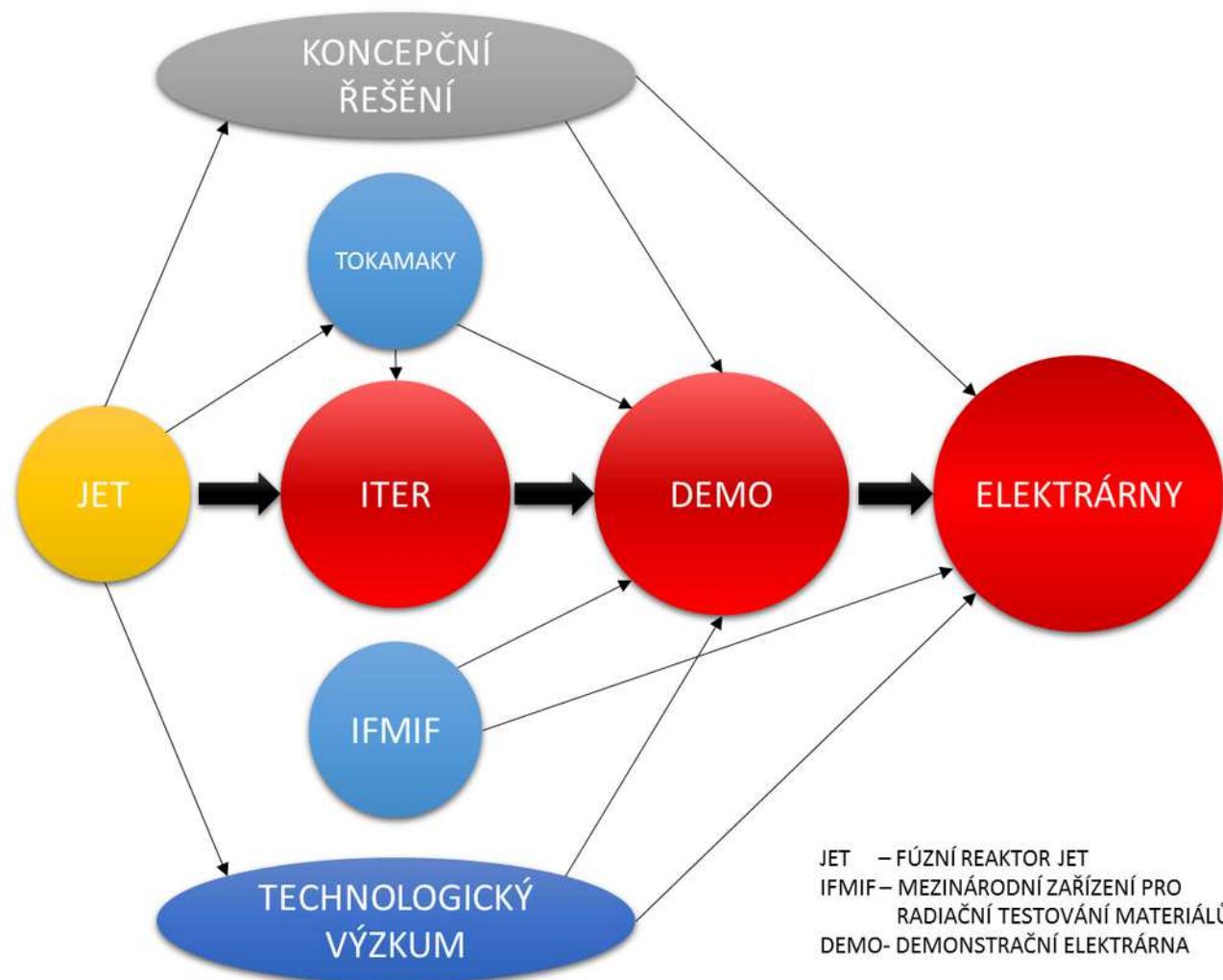




**Stavba
ITERu
2014-15**



CO DÁL



DEMO DESIGN

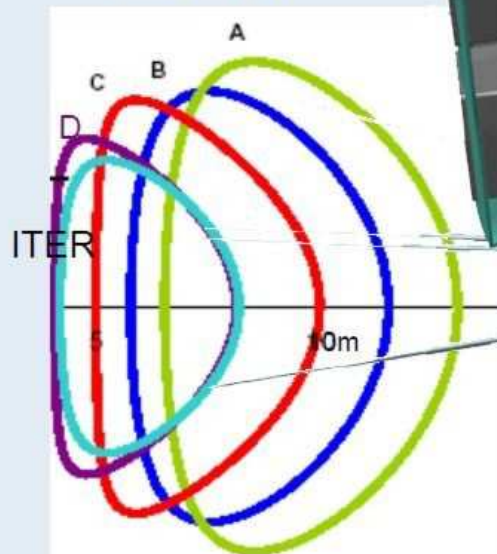
Balance of
Plant

Magnets

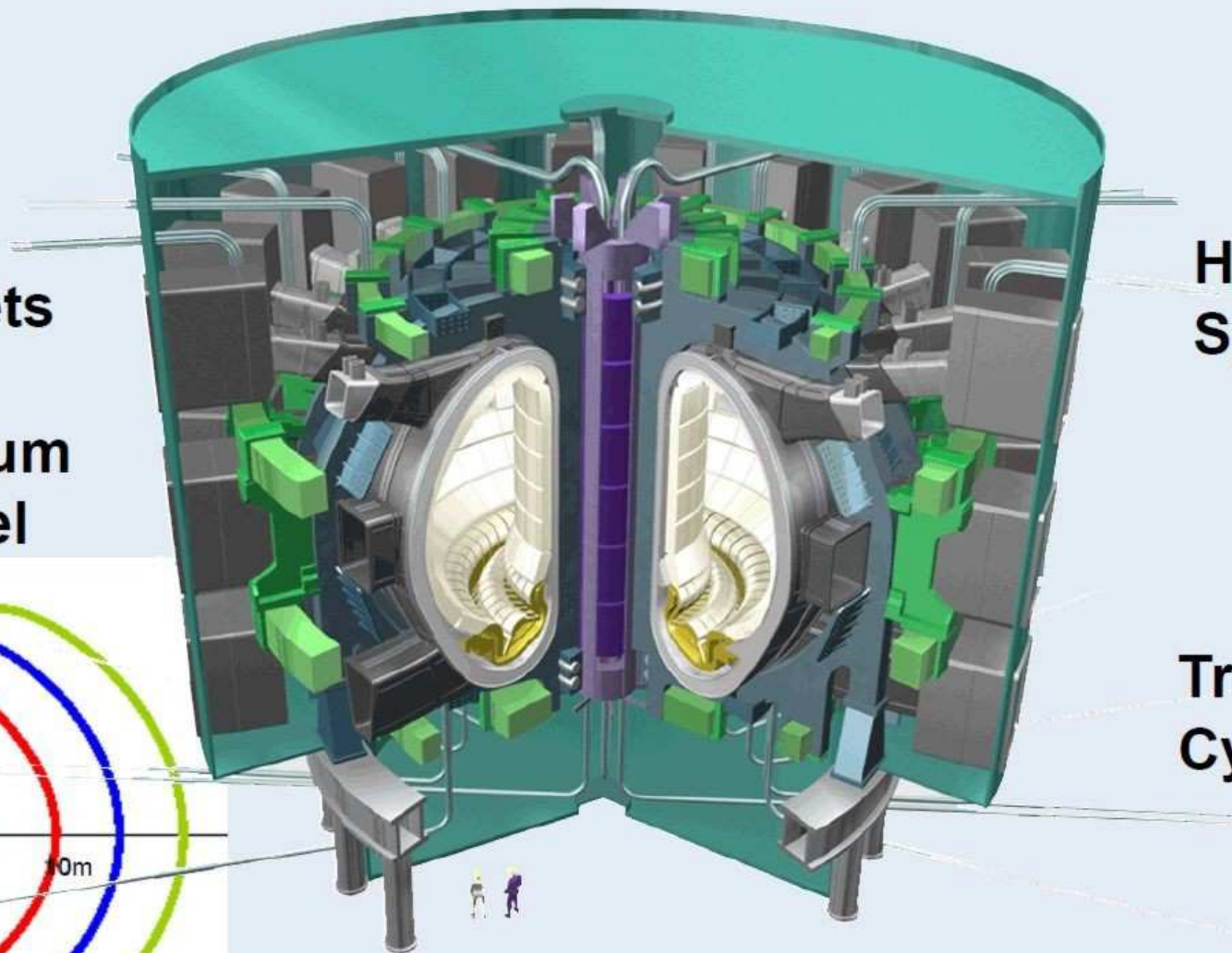
Vacuum
Vessel

Heating
Systems

Tritium
Cycle



Remote
Handling



PARAMETRY VARIANTY A

ELEKTRICKÝ VÝKON 1.55 GW

FÚZNÍ VÝKON 5 GW

HLAVNÍ POLOMĚR 9.55 m

MAGNETICKÉ POLE NA OSE 7 T

PROUD PLAZMATEM 30.5 MA

STŘEDNÍ TEPLOTA 22 keV

HUSTOTA PLAZMATU $1.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

$Q = 20$

STLAČENÉ TERČÍKY

UDRŽENÍ JE DÁNO DOBOU ROZLETU

$$\tau \approx R/\sqrt{(3/2 k_B T/M)}$$

DOSAZENÍ DO KRITÉRIA $\rho R > 10 \text{ kg/m}^2$

ZA DOBU τ JE TŘEBA TERČÍK OHŘÁT
POTŘEBNÁ ENERGIE $E \approx 4/3\pi R^3 \cdot 3nk_B T$

VHODNÉ PARAMETRY :

0.5 mm DT KULIČKA (0.01 mg) STLAČENÁ NA
POLOMĚR 0.05 mm

DOBA OHĚVU cca 1 ns

DODANÁ ENERGIE 0.3 MJ

ZÍSKANÁ ENERGIE 3.4 MJ

STLAČENÍ TERČÍKU

→ Radiation



Laser beams or laser-produced x rays rapidly heat the surface of the fusion target, forming a surrounding plasma envelope.

→ Blowoff



Fuel is compressed by the rocketlike blowoff of the hot surface material.

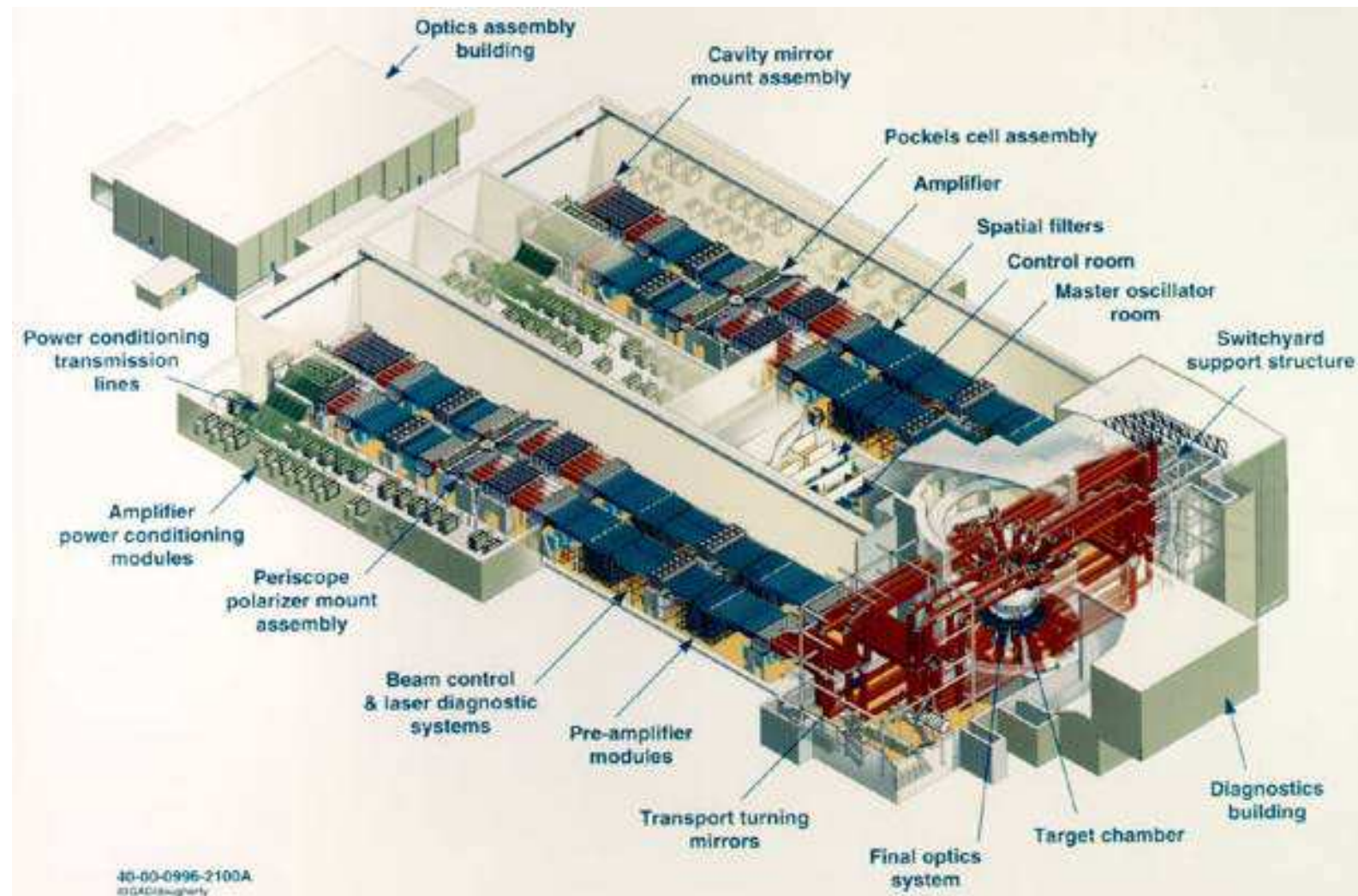
→ Inward transported thermal energy



During the final part of the capsule implosion, the fuel core reaches 20 times the density of lead and ignites at $100,000,000^{\circ}\text{C}$.



Thermonuclear burn spreads rapidly through the compressed fuel, yielding many times the input energy.



NATIONAL IGNITION FACILITY

NIF
už funguje
v Livermore,
CA

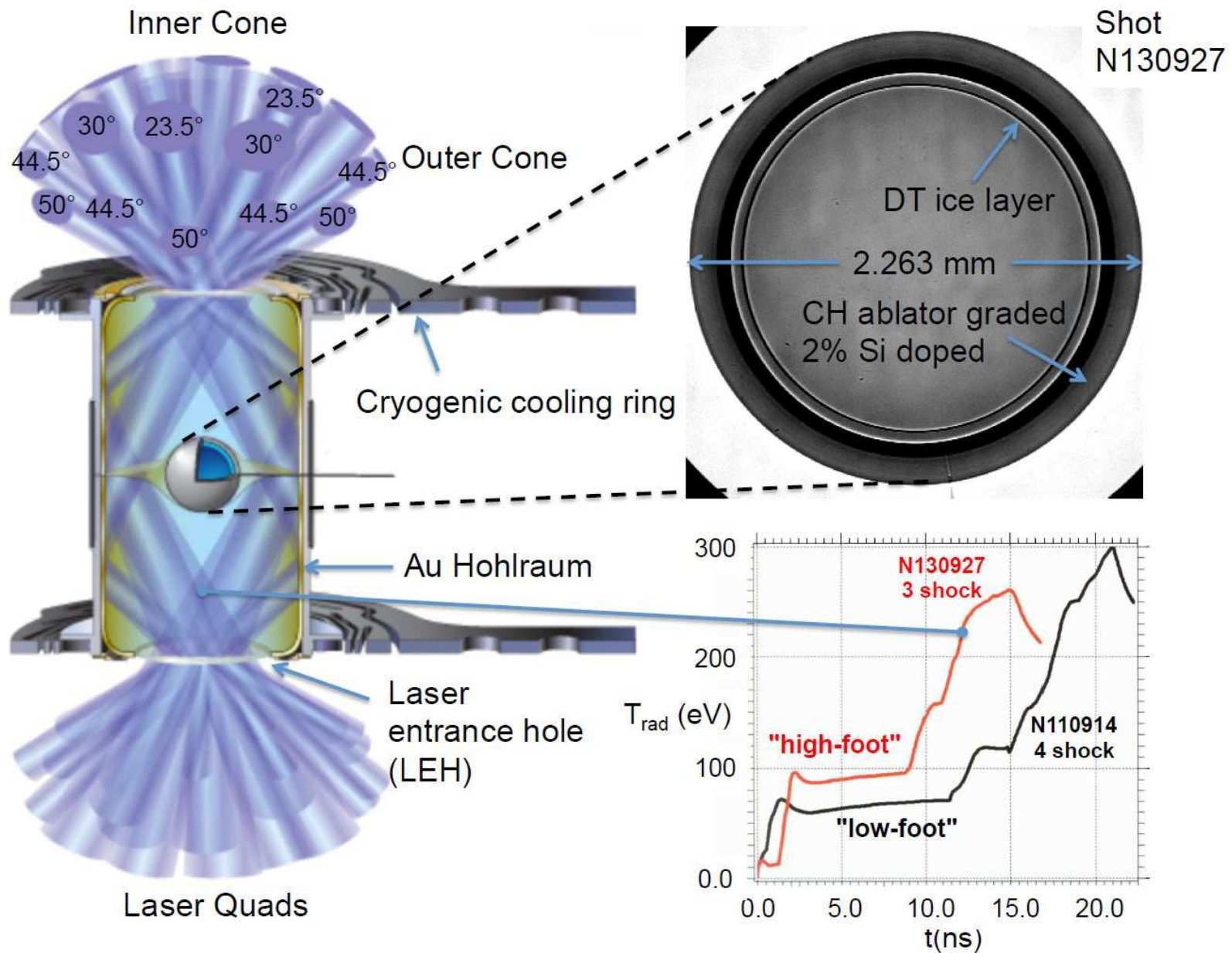


Dosáhli tam už $Q > 1$

**192 LASERŮ, S VÝKONEM 1.8 MJ,
POLOMĚR KAPSLE ≈ 1 mm
VRSTVIČKA LEDU DT TLOUŠŤKY ≈ 70 μm
VYVOLANÝ TLAK ≈ 10 TPa
TEPLLOTA ≈ 5 keV
 $\rho r \approx 1.5$ kg m⁻²
 $Q \approx 1.9$**

Problém technologie : účinnost laserů

VÝSLEDEK Z NIF



The background is a complex fractal pattern. It features a central, highly detailed, branching structure in a vibrant green color. This central structure is surrounded by a field of smaller, similar green fractal elements. The entire composition is set against a solid black background, which makes the green fractal patterns stand out prominently. The overall effect is one of organic complexity and depth.

KONEC