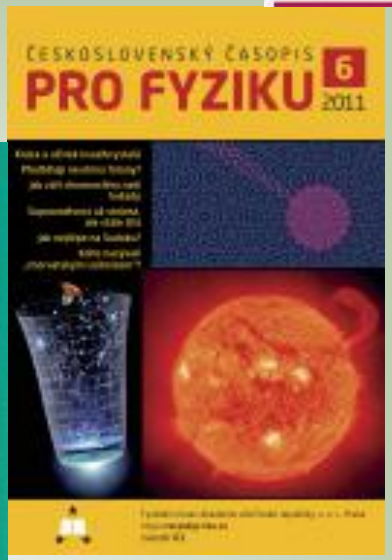
Fenomén OKLO

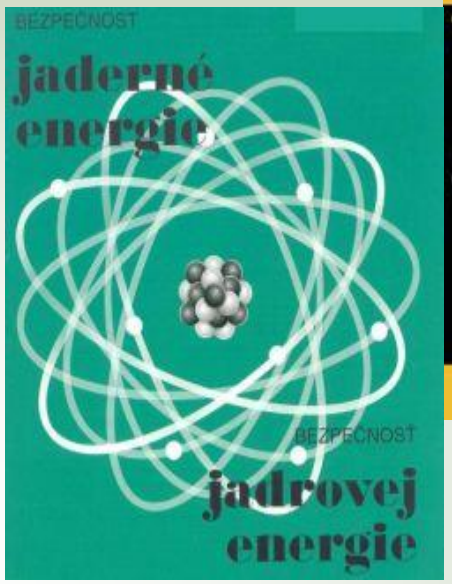
Irena Špendlíková, Jan Krmela

Lukáš Závorka

Motivace

- prezentace
- články
- postery





NE•RS 2009

MIKULÁŠSKÁ SETKÁNÍ

Mladé generace České nukleární společnosti

Co to je OKLO?

- oblast uranových nalezišť
- západní rovníková Afrika
- stát Gabon
- bývalá francouzská kolonie

Uran

Objev uranu

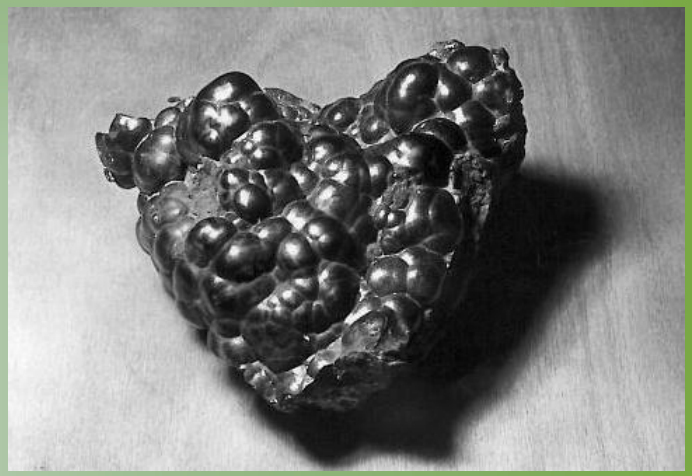
Martin Heinrich Klaproth v 1789

- připravil zřejmě oxid

Eugène-Melchior Péligot v 1841

- v čisté formě

Jáchymovský smolinec



Chemie uranu

- kovový uran - bílý lesklý kov, rychlá pasivace oxidy
- šestá vedlejší skupina (ox. čísla - III, IV, V a VI)
- nejstálejší oxidační stavy IV (U^{4+}) a VI (UO_2^{2+})

Izotopy uranu

U 226	U 227	U 228	U 229	U 230	U 231	U 232	U 233	U 234	U 235	U 236	U 237	U 238	U 239	U 240
0,5 s	1,1 s	9,2 m	58 m	20,8 d	4,2 d	71,7 a	$1,59 \cdot 10^5$ a	$1,59 \cdot 10^5$ a	$7,04 \cdot 10^5$ a	$2,342 \cdot 10^7$ a	6,75 d	$4,47 \cdot 10^9$ a	23,5 m	14,1 h
α 7,43	α 6,87	ε α 6,68; 6,59	ε α 6,360; 6,332	α 5,889; 5,818	ε α 5,46; γ 26; 84; 220	α 5,320; 5,264 sf	α 4,824; 4,783	α 4,774; 4,722 sf	α 4,365; 4,401 γ 186; 144 sf	α 4,494; 4,445 sf	β⁻ 1,2; 1,3 γ 60; 208	α 4,196; 4,149 sf	β⁻ 1,2; 1,3 γ 75	β⁻ 0,4 γ 44

^{238}U – přírodní radionuklid s poločasem srovnatelným se stářím Země ($4,5.10^9$ let); zastoupení 99,2742%

^{235}U – přírodní radionuklid (7.10^5 let); zastoupení 0,7204%

^{234}U – přírodní radionuklid ($1,6.10^5$ let); zastoupení 0,0054%

Izotopy uranu

U 226 0,5 s α 7,43	U 227 1,1 s α 6,87	U 228 9,2 m ε α 6,68; 6,59	U 229 58 m ε α 6,360; 6,332	U 230 20,8 d α 5,889; 5,818	U 231 4,2 d ε α 5,46; γ 26; 84; 220	U 232 71,7 a α 5,320; 5,264 sf	U 233 $1{,}59 \cdot 10^5$ a α 4,824; 4,783	U 234 $1{,}59 \cdot 10^5$ a α 4,774; 4,722 sf	U 235 $7{,}04 \cdot 10^8$ a α 4,365; 4,401 γ 186; 144 sf	U 236 $2{,}342 \cdot 10^7$ a α 4,494; 4,445 sf	U 237 6,75 d β⁻ 1,2; 1,3 γ 60; 208	U 238 $4{,}47 \cdot 10^9$ a α 4,196; 4,149 sf	U 239 23,5 m β⁻ 1,2; 1,3 γ 75	U 240 14,1 h β⁻ 0,4 γ 44

^{238}U – přírodní radionuklid s poločasem srovnatelným se stářím Země; zastoupení 99,2742%

<u>příprava ^{239}Pu do bomb</u>

^{235}U – přírodní radionuklid, využití především v energetice a pro vojenské účely; zastoupení 0,7204%

<u>štěpný materiál pro palivo i bomby</u>

^{234}U – přírodní radionuklid; zastoupení 0,0054%

^{233}U – umělý radionuklid; **<u>štěpný materiál pro palivo i bomby</u>**

Historie objevu fenoménu Oklo

Vše začalo v 1972 v Pierrelatte ve Francii

- na břehu řeky Rhony
- přepracovatelský a obohacovací závod za vojenskými účely
- produkce HEU od 1964 – 1996
- plus 4 lehkovodní reaktory (80. léta)
- 75% elektrické energie z jaderné energie

Historie objevu fenoménu Oklo

- 1972 Pierrelatte, Francie
- izotopové analýzy
- 0,7171% ^{235}U
- jak je to možné?
  - směs s ochuzeným uranem
- odkud uranová ruda pochází?

0,3% ^{235}U

GABON, OKLO

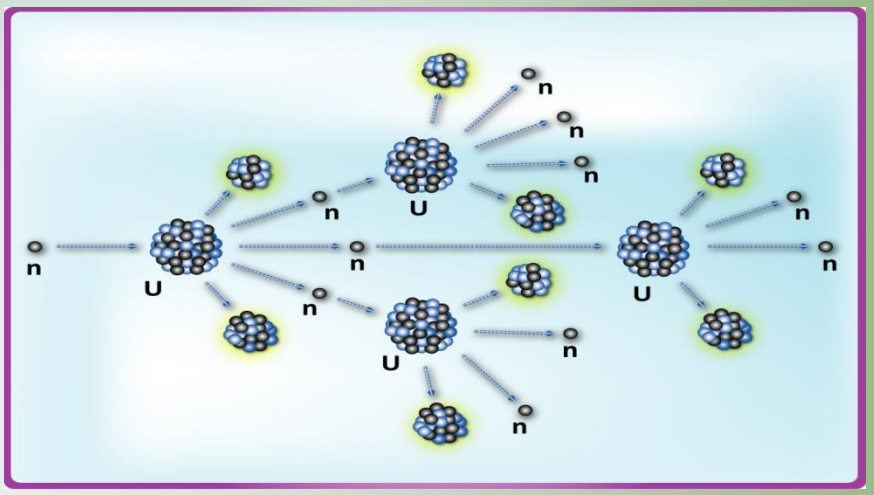
??? Přírodní reaktory ???

2 miliardy let

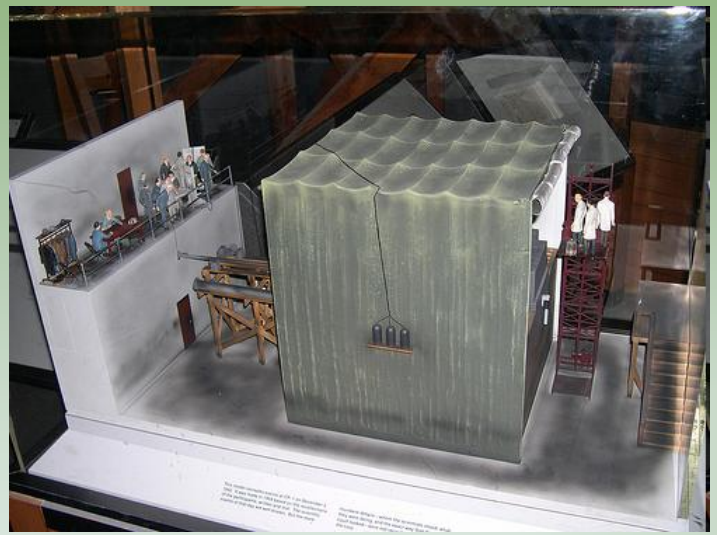
Přírodní štěpné reaktory?

Teoreticky předpovězeny r. 1956 P.K. Kuroda

- velikost přírodního reaktoru (min. 2/3 m)
- procentuální zastoupení uranu 235 (3 - 4%)
- vysoká koncentrace uranu v rudě (Oklo: 50-60%) a nízká koncentrace neutronových jedů (B, vzácné zeminy)
- přítomnost moderátoru – látky s lehkými jádry (vodík)



Překvapení pro lidstvo



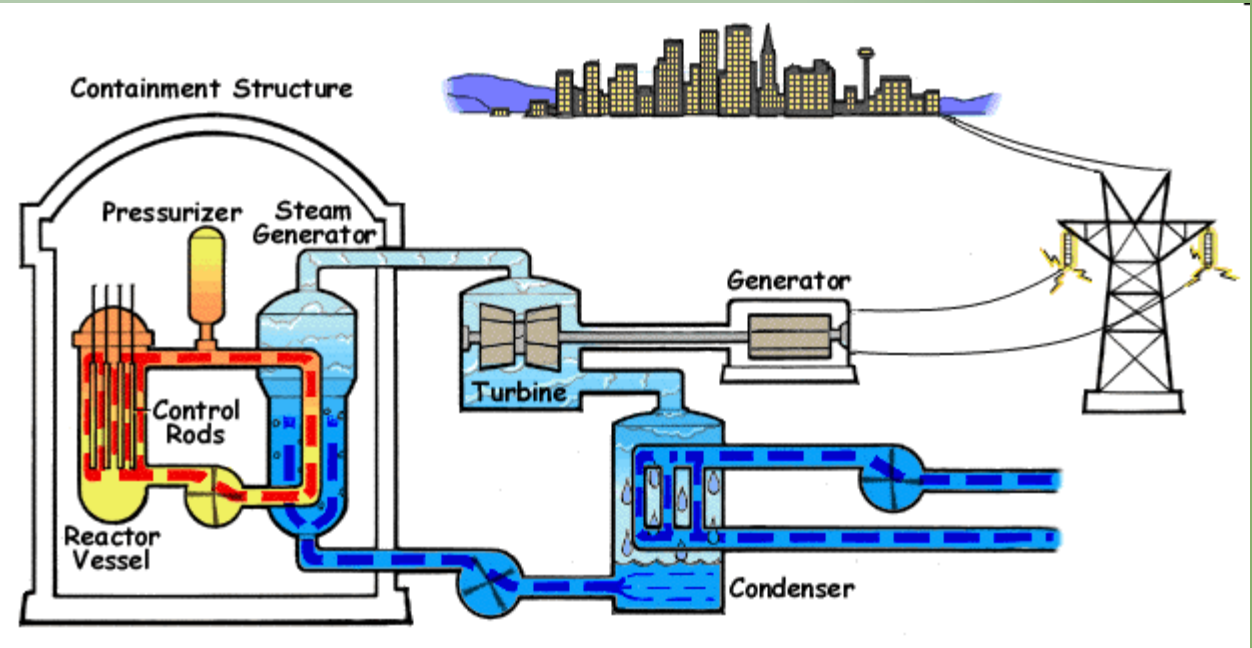
Model CP1 – Chicago Pile 1

Enrico Fermi

- 2. prosince 1942
- University of Chicago
- první reaktor s jaderným štěpením uranu řízený lidmi
- uranové pelety s grafitovými bloky

Uran jako zdroj energie

Tlakovodní Reaktory (PWR - Pressurized Water Reactors; VVER)



Uran jako zdroj energie

<u>Tlakovodní reaktory</u> - obohacení izotopem ^{235}U na 2 – 4 %

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{x}X + {}^{y}Y + 2 \div 3n$$

Jako jaderné palivo se dá využít rovněž přírodní uran (reaktory typu CANDU a Magnox)

Z izotopu ^{238}U se v každém reaktoru pomocí rychlých neutronů (1 MeV) vzniká plutonium (především ^{239}Pu (24000 r) – štěpitelný materiál). V každém reaktoru je nutné počítat s Pu!

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U + \gamma$$

$$^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np + ^{0}_{-1}e + \bar{\nu} + \gamma$$

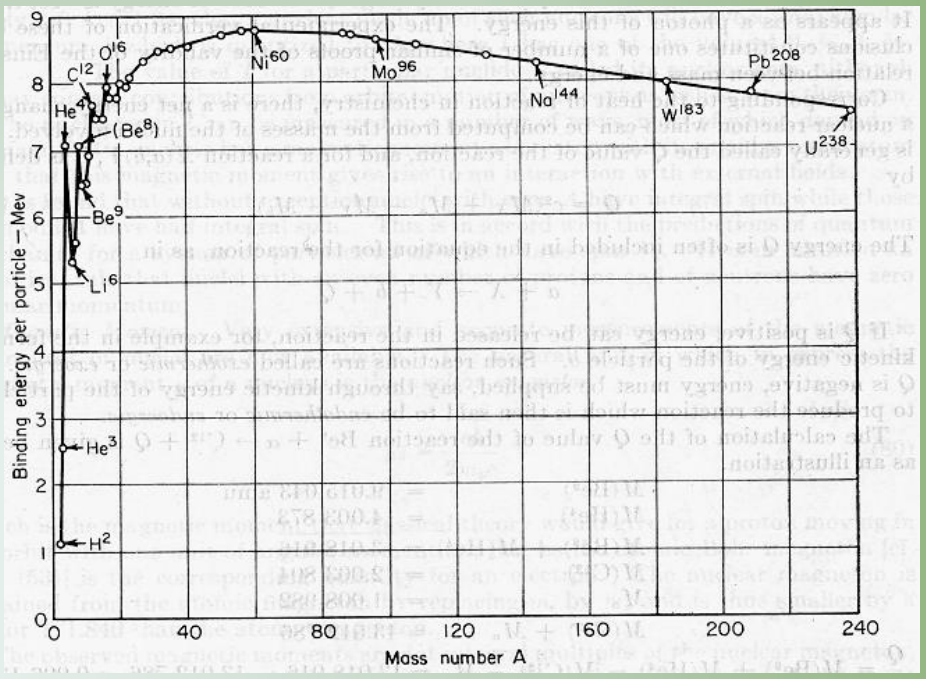
$$^{239}_{93}Np \rightarrow ^{239}_{94}Pu + ^{0}_{-1}e + \bar{\nu} + \gamma$$

Energie z jader

Odkud se tato energie bere?

$$\Delta M = Z\,m_p + (A - Z)m_n - M(A,Z);\ \Delta E = c^2 \Delta M$$

ΔE/A – vazebná energie připadající na jeden nukleon – koeficient stěsnání



Energie z jader

Hypotetický rozpad jádra (A=200, ΔE/A=7,5 MeV) by vedlo ke vzniku středních štěpných jader s ΔE/A=8,5 MeV => uvolnění energie 200 MeV na jedno štěpné jádro

=> 1g ^{235}U vyprodukuje energii (200/235).6,023E23 MeV = 8.10E10 J = 2,5 t spáleného antracitu

Vznik ložiska OKLO

uranové sloučeniny nerozpustné ve vodě při nízké koncentraci O_2

éra zelených rostlin → zvýšení koncentrace O_2 ve vodě

rozpuštění uranu z hornin

vznik rozpustných uranyl-karbonátů

mořské mikroorganismy schopné zadržovat a shromažďovat uran

Geologie ložiska

<u>Uranonosné pískovce</u>

-vázány na fluviální (říční) sedimenty

- středně či hrubě zrnité špatně vytříděné pískovce s obsahem pyritu nebo rostlinné organiky => šedé barvy

- 4 dvojice: U-V, U-Zr, U-Cu, U-Mo

- 0,06 – 0,1 % uranu

Uranonosné pískovce
Colorado Plateau, Wyoming, USA

Geologie ložiska

<u>Penekonkordantní typ</u>

- vznik
  - intenzivní zvětrávání
  - sladkovodní sedimentace
  - intruze vulkanitu
- možnosti těžby
  - povrchově, důlně
  - chemická těžba (ISL – In Situ Leaching)

<u>IN SITU LEACHING</u>

Stráž (U-Zr), Dolnoslezská pánev (Bečkov, Radvanice;U-Cu), Slovensko (Novomeská Huťa, Muráň; U-Mo)

Kritický stav reaktoru

$$k_\infty = \eta \varepsilon p f$$

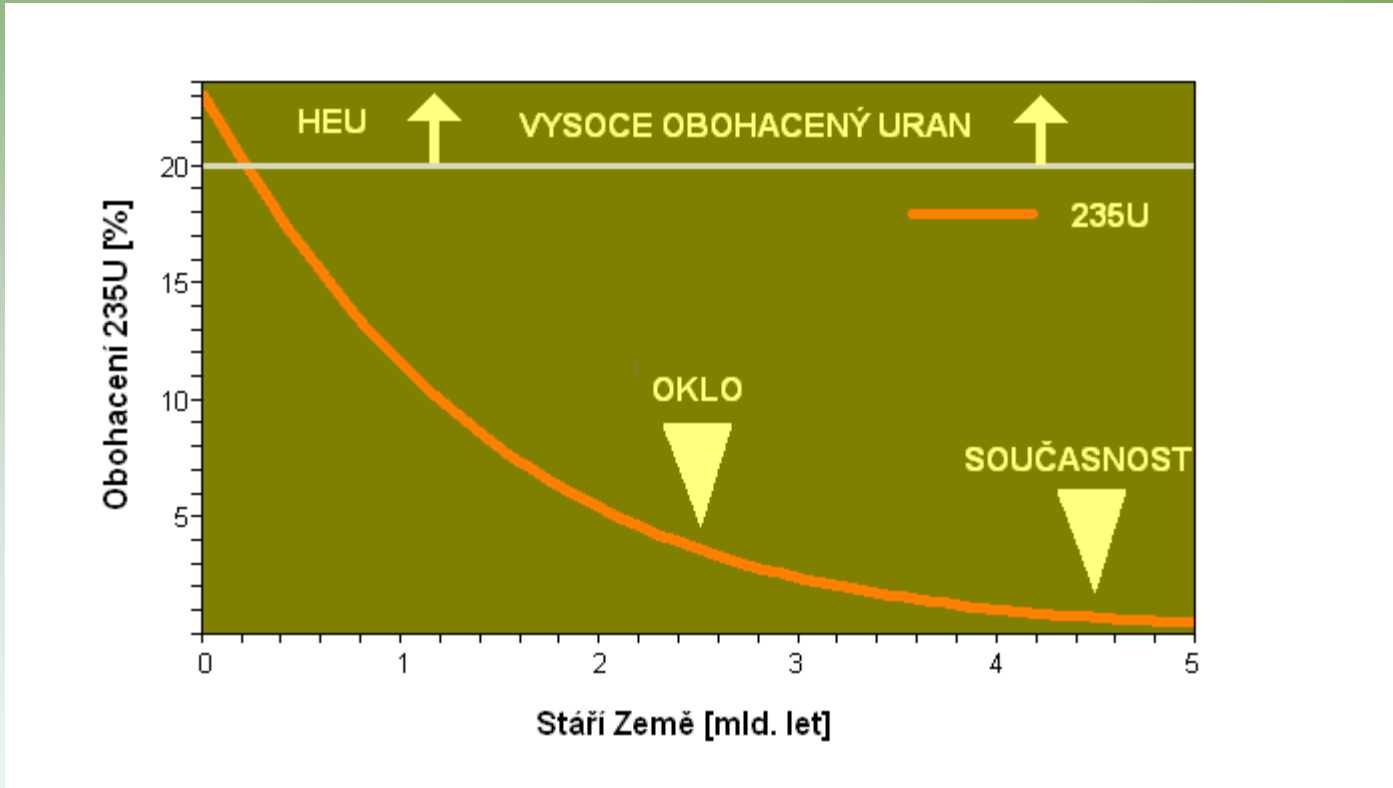
rozběhnutí štěpné řetězové reakce: $k_\infty > 1$ (koeficient násobení)

Ovlivněno mnoha faktory, zejména složením (obohacením) paliva, přítomností nečistot, okolní teplotou, druhem a koncentrací moderátoru.

Tab: Koeficienty *p* (pravděpodobnost úniku rezonančnímu záchytu), *f* (koeficient využití tepelných neutronů), *η* (regenerační faktor), ε (koeficient násobení rychlými neutrony) a k_∞ pro vzorek smolince z naleziště Johanngeorgenstadt v závislosti na poměru voda-uran v době před 2,1 mld. let

$n\ (H_2O)$	1/4	1/2	1	2	3	4	5	10
p	0,29	0,47	0,62	0,74	0,79	0,82	0,84	0,86
f	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,81
η	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91
$\boldsymbol{k_\infty}$	0,55	0,88	1,15	1,34	1,40	1,42	1,43	1,33

Obohacení uranem 235

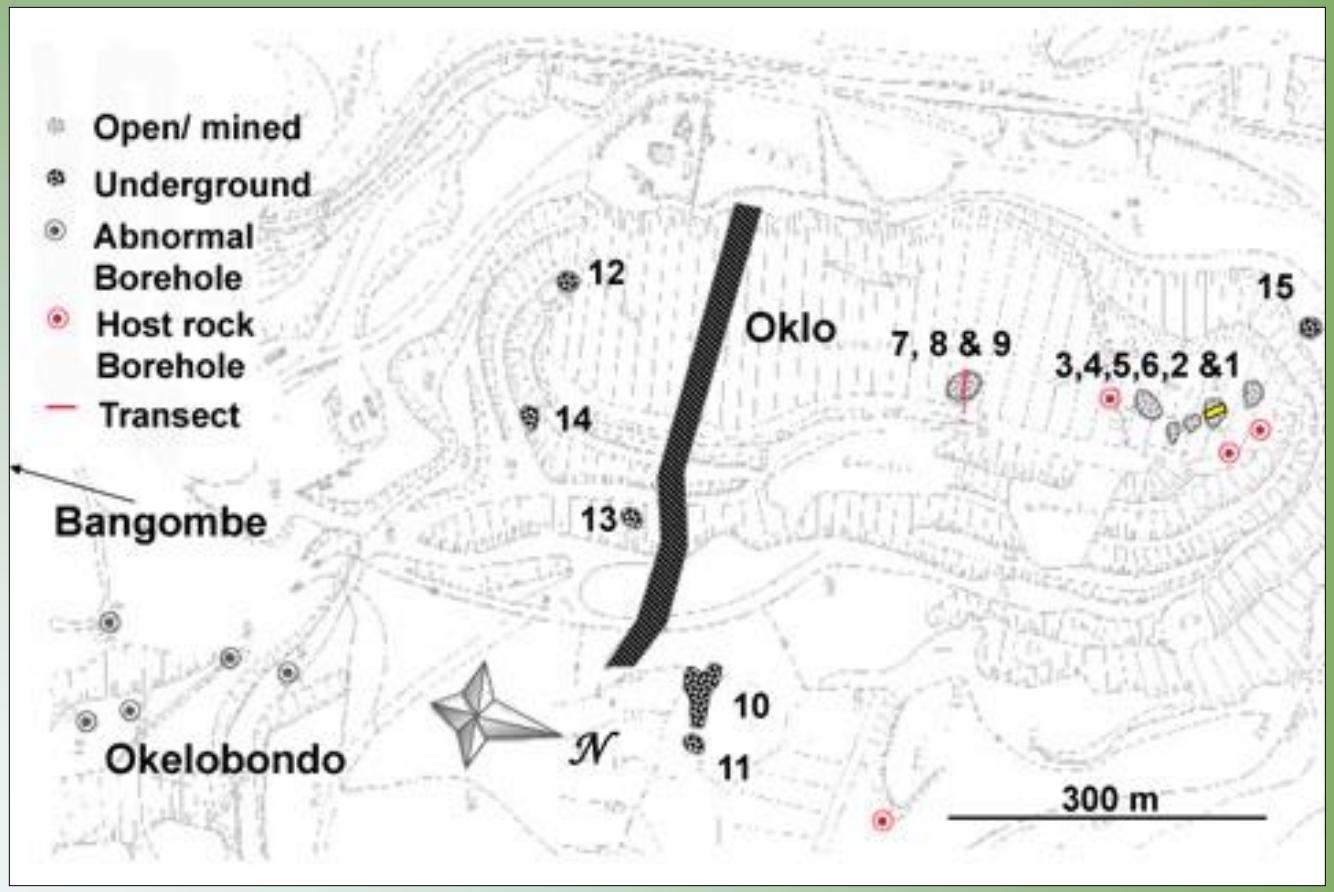


pro systém tvořený z 2,4 molekuly vody a 1 atomu uranu před 2 miliardami let přibližně vypočten na hodnotu $k_\infty \approx 1{,}3$

Reaktorové zóny

počet reaktorových zón v oblasti Oklo	> 16
množství spotřebovaného ^{235}U	> 5 tun
množství vygenerovaného ^{239}Pu	> 2 tuny
uvolněná energie	≈ 15 GWlet
doba udržení řetězové reakce	150 000 let
stáří reaktorů	1,9 miliard let
rozměry zón	délka: 10-20 m tloušťka: do 1 m
teplota v reaktorech	< 400°C
průměrný výkon jednoho reaktoru	100 kW
efektivní neutronový tok	až 10^{21} neutron/cm^2

Reaktorové zóny



Mapa rozmístění reaktorových zón