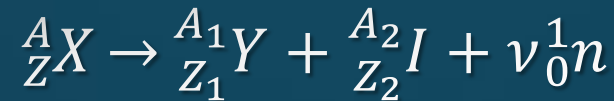




Нуклеарна ланчана реакција

Принципи рада нуклеарних реактора

Ланчана реакција фисије



- за фисију ^{235}U $\nu=2,42$ -> неутрони настали у фисији могу изазвати нове фисије -> ланчана реакција.
- Нуклеарну ланчану реакцију открио Szillard 1933.
- 1939. Откриће фисије уранијума -> ланчана реакција могућа и са неутронима из фисије уранијума?

Енергија фисије се може искористити?

- $E_{\text{фисије}} \approx 200 \text{ MeV}$

- $E_{\text{фисије}} = 2 \cdot 10^8 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,204 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

- Да би се произвео 1 W потребан број фисија у секунди је

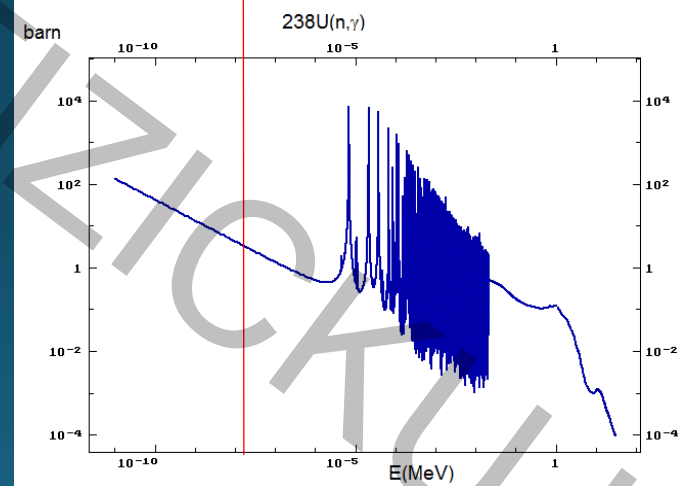
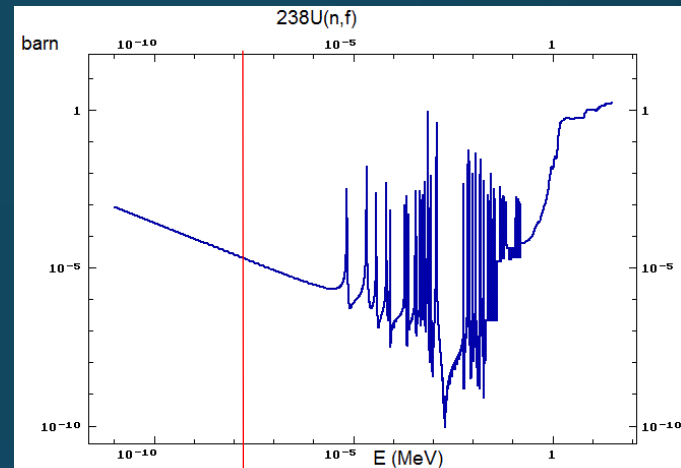
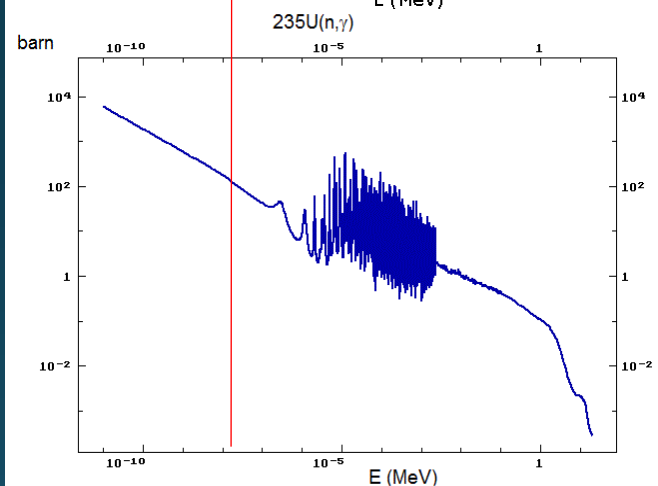
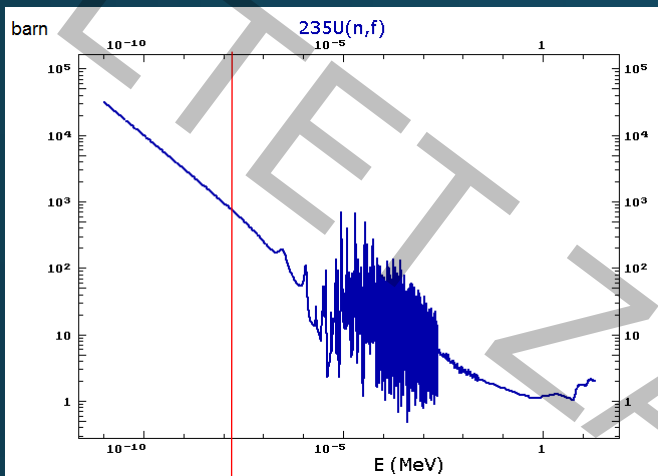
$$N_f = \frac{1}{3,204 \cdot 10^{-11} \text{ J}} = 3,121 \cdot 10^{10}$$

- Да би се добила 3 GW у току једног дана маса утрошеног нпр ^{235}U је

$$m_{^{235}\text{U}} = \frac{M}{N_a} \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot 3,121 \cdot 10^{10} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 3,156 \text{ kg}$$

- Да би се добила иста снага потребно је сагорети 9468 t угља

Ефикасни пресеци за реакције са неутронима



- регион 1. $\sigma_f > \sigma_c$ реакције фисије на ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Pu
- Регион 2. $1-10^5$ eV доминира радијативни захват
- $E=0,6$ MeV фисија ^{238}U

Фактор фисије

- -> мала је вероватноћа да сви неутрони ослобођени у једној фисији (и термализовани) доведу до нових фисија.

$$\eta = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_f + \Sigma_\gamma} = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_\gamma} = \nu \frac{1}{1 + \alpha}$$

- η – средњи **фактор фисије** или неутронски принос по апсорпцији

$$\alpha = \frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f}$$

- **Основни услов** за одвијање ланчане реакције је
 $\eta > 1$

Уколико се ради о природном уранијуму ($^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}$) макроскопски ефикасни пресеци за термалне неутроне ће бити

$$\Sigma_f = 0,0072 \cdot 582 \text{ barn} = 4,1904 \text{ } ^{235}\text{U}$$

$$\Sigma_\gamma = (0,0072 \cdot 99 + 0,993 \cdot 2,70) = 3,3939 \text{ } ^{238}\text{U}$$

• $\rightarrow \alpha = 0,81 \rightarrow \eta = 1,34 \rightarrow$

• Ланчана реакција фисије је могућа и на природном уранијуму!

• За чист ^{235}U $\eta = 2,068$

Неутронски буџет

- Услов за одвијање ланчане реакције дат је преко фактора умножавања

$$k = \frac{\text{број неутрона у генерацији } n}{\text{број неутрона у генерацији } n - 1}$$

- $k < 1$ поткритична вредност – ланчана реакција није могућа
- $k = 1$ испуњен услов за ланчану реакцију
- $k > 1$ надкритичност – континуирани пораст броја неутрона
- Неутрони у једној генерацији трпе „расходе“, али има и „прихода“
- Замишљени систем: фисибилно гориво + модератор неограничених димензија

- $k_{\infty} = \eta$

Приход : неутрони из фисије изазване брзим неутронима.
Допринос се исказује преко *фактора брзе фисије ε ($\varepsilon > 1$)*

$$k_{\infty} = \eta \varepsilon$$

Расход: у области епитермалних енергија – резонантни захват неутрона ((n, γ) реакције). Узима се у обзир преко *фактора избегавања резонанција p ($p < 1$)*

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p$$

Расход: примесе у систему такође могу да захвате неутроне и тако смање њихов број. Њихов утицај се дефинише преко *фактора искоришћења термалних неутрона f*

$$f = \frac{\Sigma_{\text{гориво}}}{\Sigma_{\text{гориво}} + \Sigma_{\text{модератор}} + \Sigma_{\text{остало}}}$$

- Ово је формула „четири фактора“.

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

- k_{∞} преко трећег и четвртог члана зависи од температуре – T
↑ k_{∞} ↓.
- Пример употребе формуле на систему

Почетни број неутрона	100
$\eta = 1,34$	134
$\varepsilon = 1,03$	138
$p = 0,9$	124
$f = 0,9$	112
k_{∞}	1.12

Реални систем - коначне димензије

$$k_{\text{еф}} = k_{\infty} \Lambda_{\text{брзи}} \Lambda_{\text{термални}} = k_{\infty} \Lambda$$

- $\Lambda_{\text{брзи}}$ и $\Lambda_{\text{термални}}$ су фактори (не)цурења одговарајућих неутрона
- Зависе од геометрије система и средњег слободног пута
- За добро изабрану геометрију $\Lambda \approx 0,9$, па је $k_{\text{еф}} = 1,01$

$$\Lambda = \Lambda_{\text{брзи}} \Lambda_{\text{термални}} = \frac{1}{1 + B^2(L^2 + \tau)}$$

B – фактор паковања

L – растојање термалне дифузије

τ – неутронска или Фермијева старост

$$M^2 = L^2 + \tau$$

- M је миграционо растојање, а M^2 миграциона површина.
- На крају добијамо критичну једначину

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_{\infty}}{1 + B^2 M^2}$$

	B
сфера	$\pi^2 r^{-2}$
коцка	$3\pi^2 a^{-2}$
цилиндар ($h=d$)	$33h^{-2}$

радионуклид	Критична маса (kg)
^{235}U	22,8
^{233}U	7,5
^{239}Pu	5,6

Важи за сферу начињену од чистог радионуклида

Кинетика ланчане реакције фисије

- Број неутрона N у реактору се мења са временом

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k_{\text{эф}} - 1)}{\theta} + K$$

θ – средње време живота неутрона у генерацији ($10^{-3} - 10^{-4}$)

K - допринос неутронског извора (иницијатор)

решење

$$N = N_0 e^{\frac{(k_{\text{эф}} - 1)t}{\theta}} + \frac{K\theta \left(1 - e^{\frac{(k_{\text{эф}} - 1)t}{\theta}}\right)}{1 - k_{\text{эф}}}$$

Посебни случајеви

$k_{\text{эф}} < 1$ и $t \gg \theta$

$$N(t) = \frac{K\theta}{1 - k_{\text{эф}}}$$

- $k_{\text{эф}} > 1$ – систем је надкритичан. За мало K и $K\theta$ је $\ll 1$

$$N(t) = N_0 e^{\frac{(k_{\text{эф}}-1)t}{\theta}}$$

$k_{\text{эф}} = 1$ – систем је критичан

$$N(t) = N_0 + Kt$$

Временска константа реакције је

$$t_{\text{пер}} = \frac{\theta}{(k_{\text{эф}} - 1)}$$

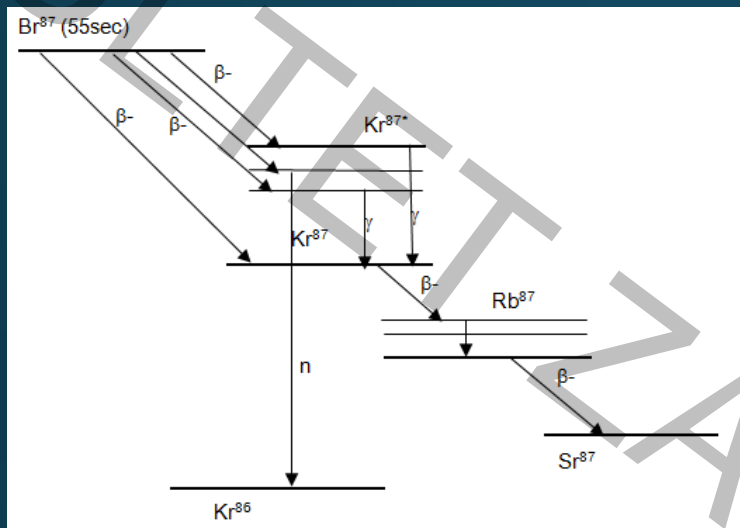
$$N(t) = N_0 e^{\frac{t}{t_{\text{пер}}}}$$

За $\theta=0,001$, $k_{\text{эф}} = 1,1$ и $t=1$ s

$$N(t) = N_0 e^{100} \text{ - неконтролисана ЛР}$$

- Ствар „спашавају“ закаснили неутрони

Њихов допринос мења θ



$$\theta_{\text{эф}} = \theta + \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i}$$

β_i је фракција неутрона који су за закаснили за λ_i

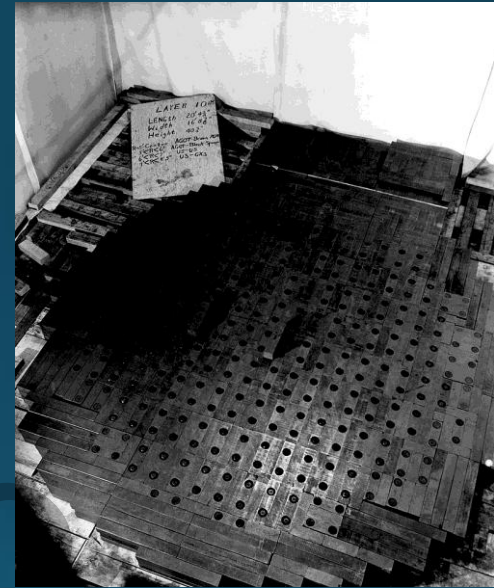
Нпр. за ^{235}U $\sum \frac{\beta_i}{\lambda_i}$ је 0,084 тако да је $\theta_{\text{эф}} = 0,001 + 0,084 = 0,094$

$$N(t) = N_0 e^{1,06t}$$

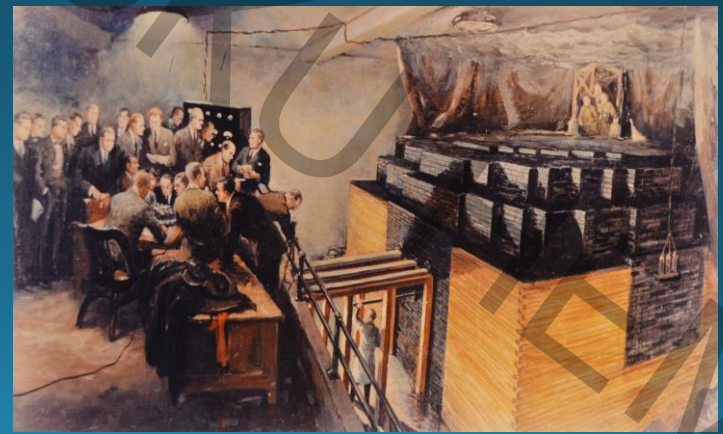
Ако је $(k_{\text{эф}} - 1) \gg \beta$ систем је тренуно критичан и закаснили неутрони немају никаккву улогу.

Прва контролисана ланчана реакција фисије

- “Chicago pile” CP-1 2. децембар 1942. (Е. Ферми и сарадници, пројекат Менхетн).



- 360 t чистог графита
- 45 t металног уранијума
- 45 t UO_2



Нуклеарни реактори

- Служе за одржавање контролисане ланчане реакције фисије у сврху
 - Производње електричне енергије
 - Добијања физионог материјала
 - Истраживања
 - Обезбеђења погона за бродове, подморнице
 - Производње нуклеарног оружја
 - Производња радиоизотопа за различите примене (најчешће медицинске)
- Подела
 - Хетерогени
 - Хомогени - само у истраживачке сврхе

• Различити концепти

- Базирани на врелој води под притиском као хладиоцем (**PWR** – pressurized water reactor)
- Базирани на кључајућој води (**BWR**-boil water reactor)
- Гасно хлађени реактори са графитом као модератором
- Оплодни реактори

80%

Гориво

- Природни уранијум у облику UO_2
- Обогаћени уранијум (2-4% ^{235}U) у облику UO_2
- Мешавина PuO_2 и UO_2

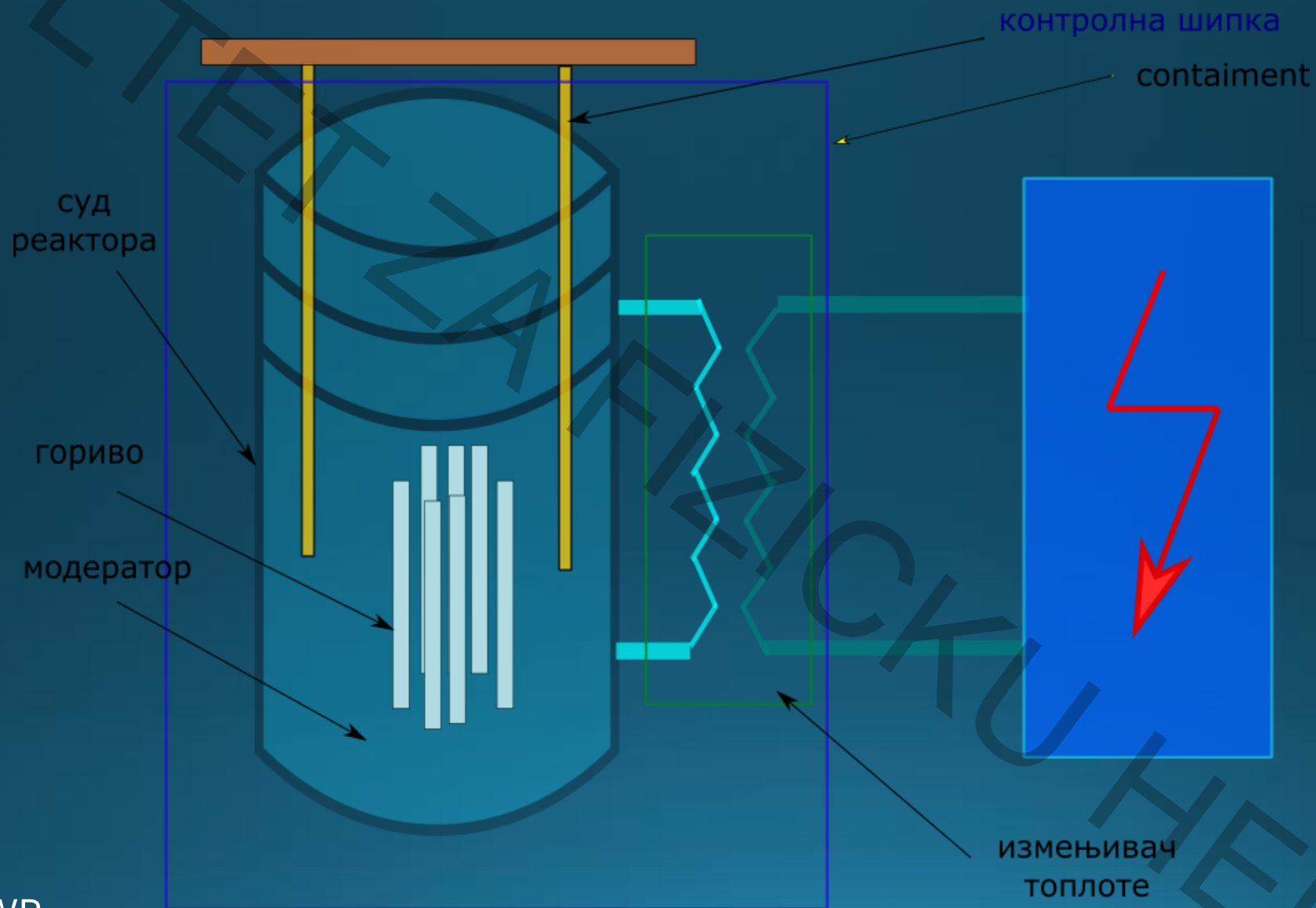
Модератор

- D_2O или графит као модератор
- обична вода као модератор
- графит
- берилијум

• Хладилац

- Модератор истовремено и хладилац
- Вода
- Гас
- Течни натријум

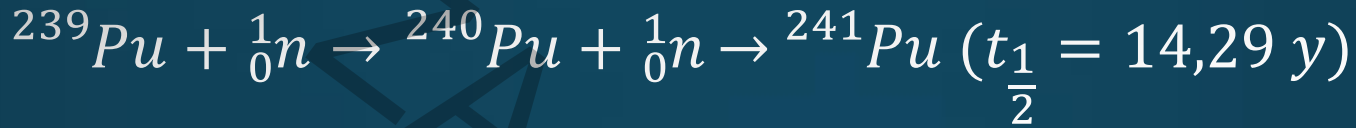
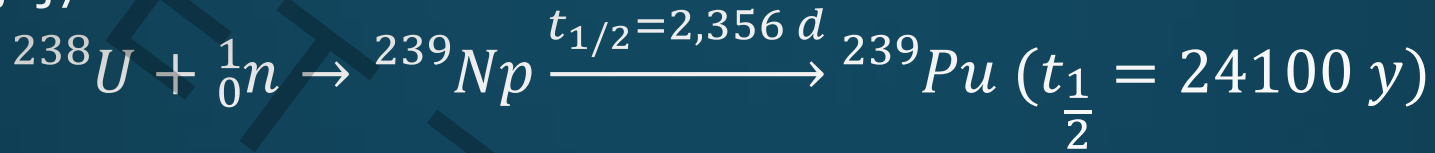
Основни делови нуклеарног реактора



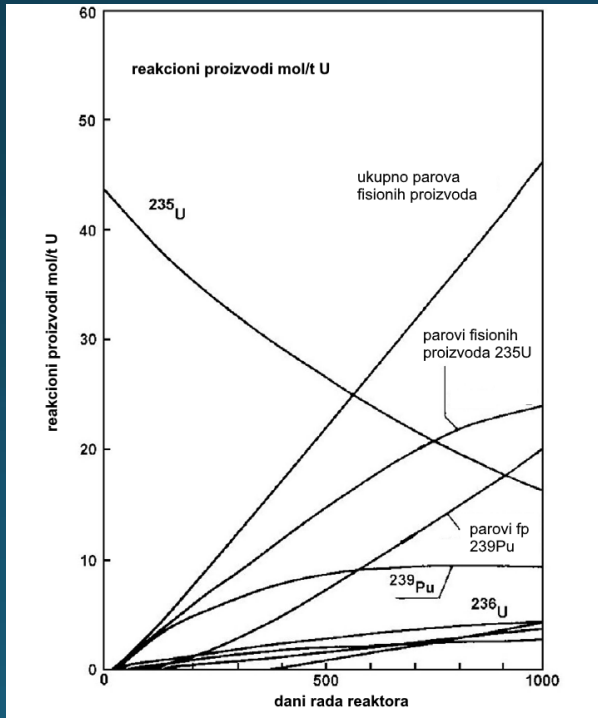
PWR

Искоришћење горива

- Поред трошења ^{235}U у реактору се у реакцијама захвата добијају ^{239}Pu и ^{241}Pu



који су фисилни/фисибилни



За 3,3 Gw по дану

^{235}U -2,2 kg

^{238}U -2.0 kg

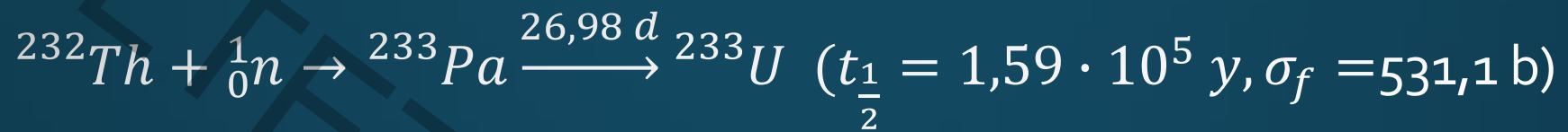
FP +3.1 kg

- Фактор конверзије

$$C = \eta - 1 - S$$

- S су губици неутрона који не укључују неутроне искоришћене за фисију или добијање фисибилних језгара.
- Нпр ако је $C=0,8$ на сваких утрошених 100 атома ^{235}U настаје 80 атома ^{239}Pu и ^{241}Pu
- Фактор $\frac{x_i}{1-C}$ где је x_i атомска фракција фисибилних језгара одређује максимално искоришћење горива
- $C \approx 1$ – оплодни реактор (конвертер)
- $C \leq 0,7$ – енергетски реактори (сагоревачи)
- $C > 1$ - оплодни реактори

- Торијума у земљиној кори има четири пута више него уранијума



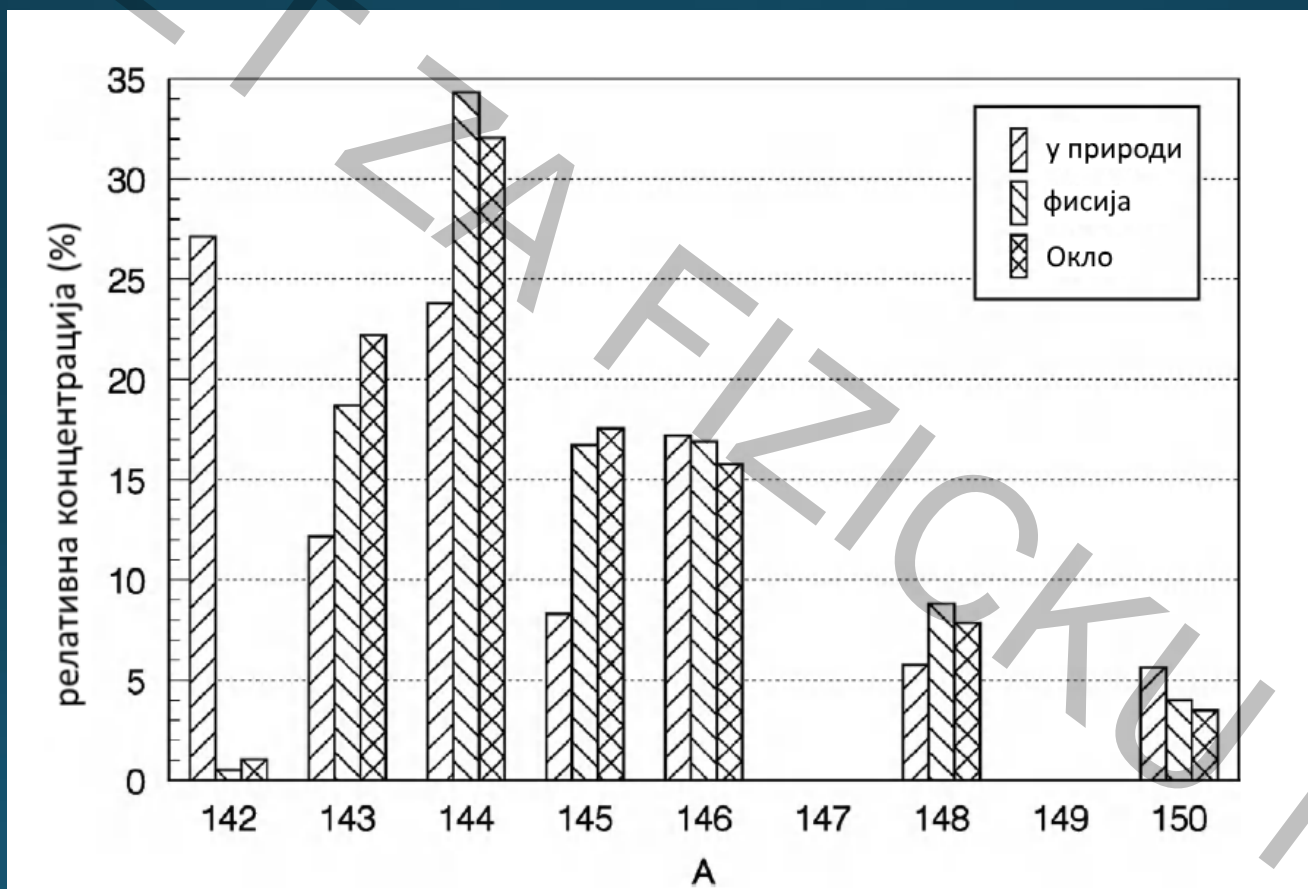
Феномен Окло - природни нуклеарни реактор

- Рутинском контролом уранијума из рудника Окло (Габон) примећено је мало одступање удела ^{235}U у $^{\text{nat}}\text{U}$ (0,7115 - нормално 0,7242%)

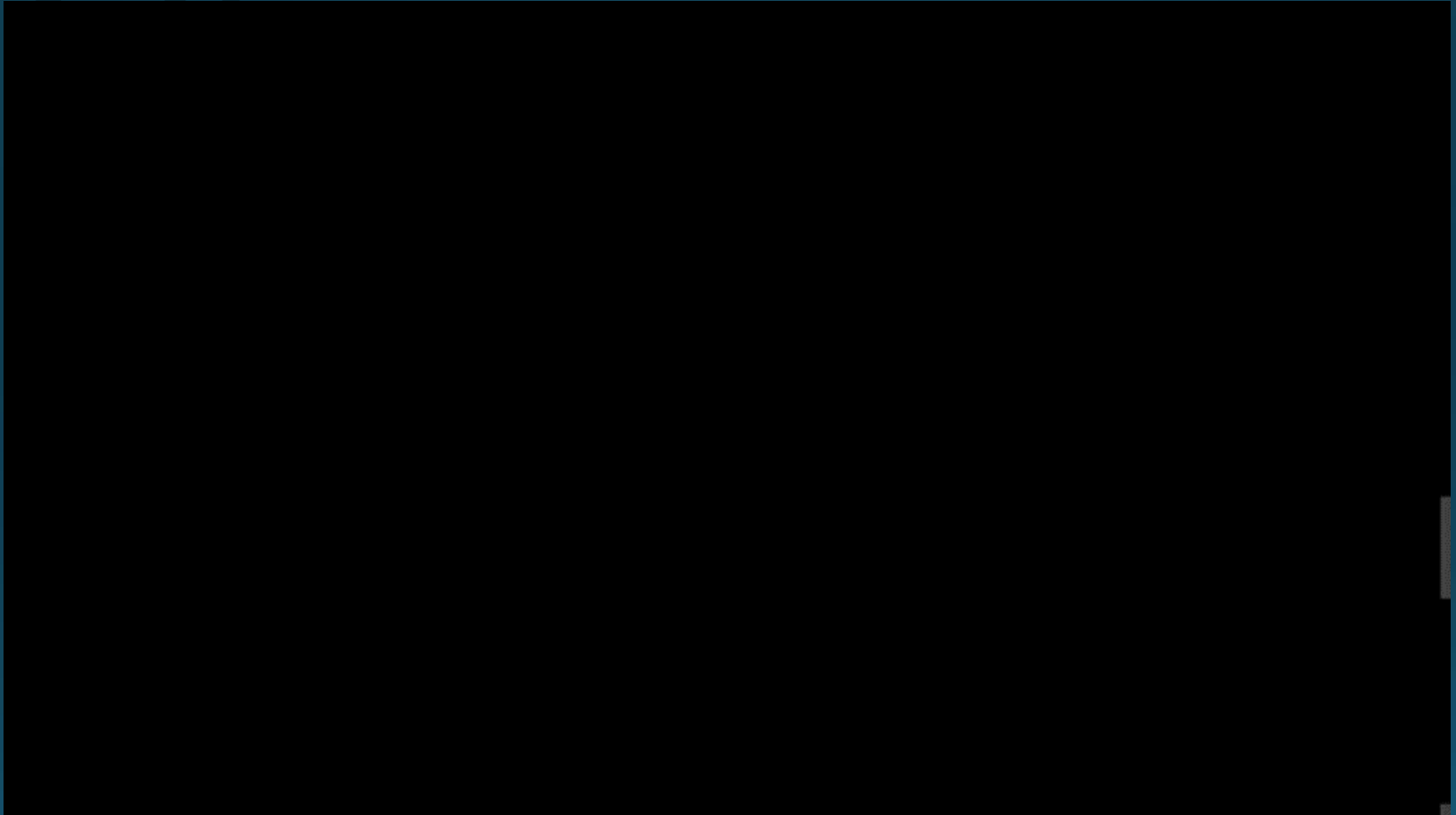


- Садржај ^{235}U (0,5 – 0,71%)
- Присутни фисиони производи

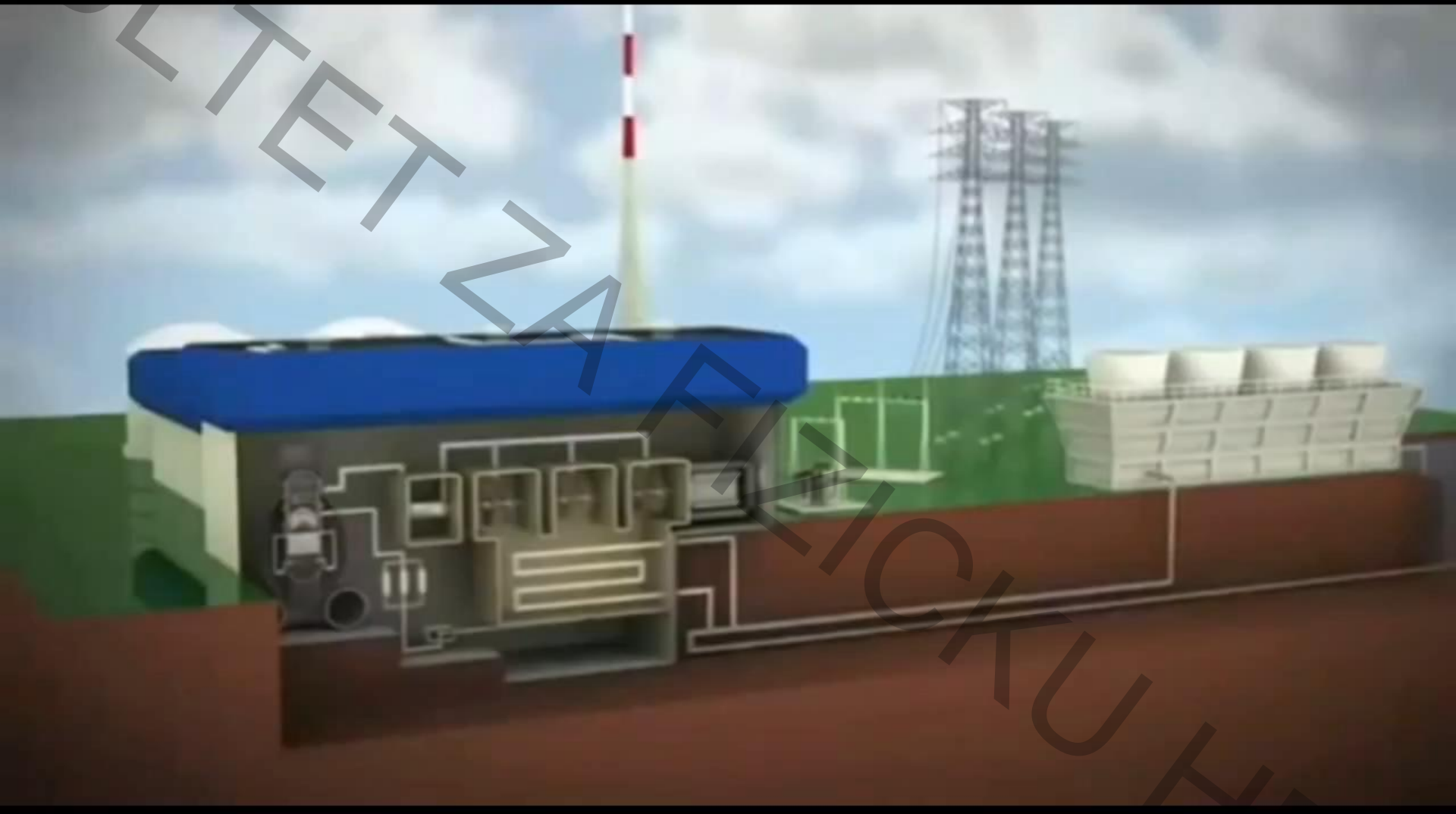
- Реактори су радили пре око $2 - 3 \cdot 10^9$ година
- Тада је ^{235}U било 3,5 %
- Аномалија у изотопском саставу неодимијума



PWR – Pressurized water reactor



BWR – boiled water reactor



Ефикасност реактора за производњу електричне енергије

• $P_{term} \approx 3GWd$ топлоте (електрана среде снаге)

али

$$\eta_{max} = \frac{T_{topl} - T_{hl}}{T_{topl}}$$

За PWR реактор

$$\eta_{max} = \frac{(548 - 302) K}{548 K} = 0,45$$

$$\eta_{net} = 0,33$$

За BWR реактор

$$\eta_{net} = 0,35$$

Стога је $P_{el} \approx 0,3P_{term}$

Електране на угаљ, нафту... $\eta_{net} = 0,5$

Сигурносне мере на реактору

- Контролне шипке
 - Фино подешавање
 - Грубо подешавање
 - Хаваријске
- Пасивна (хемијска) контрола –раствор борне киселине
- Температурска самоконтрола реактора
- Најозбиљније последице-губитак хладиоца
 - Пораст температуре језгра
 - На 1000°C

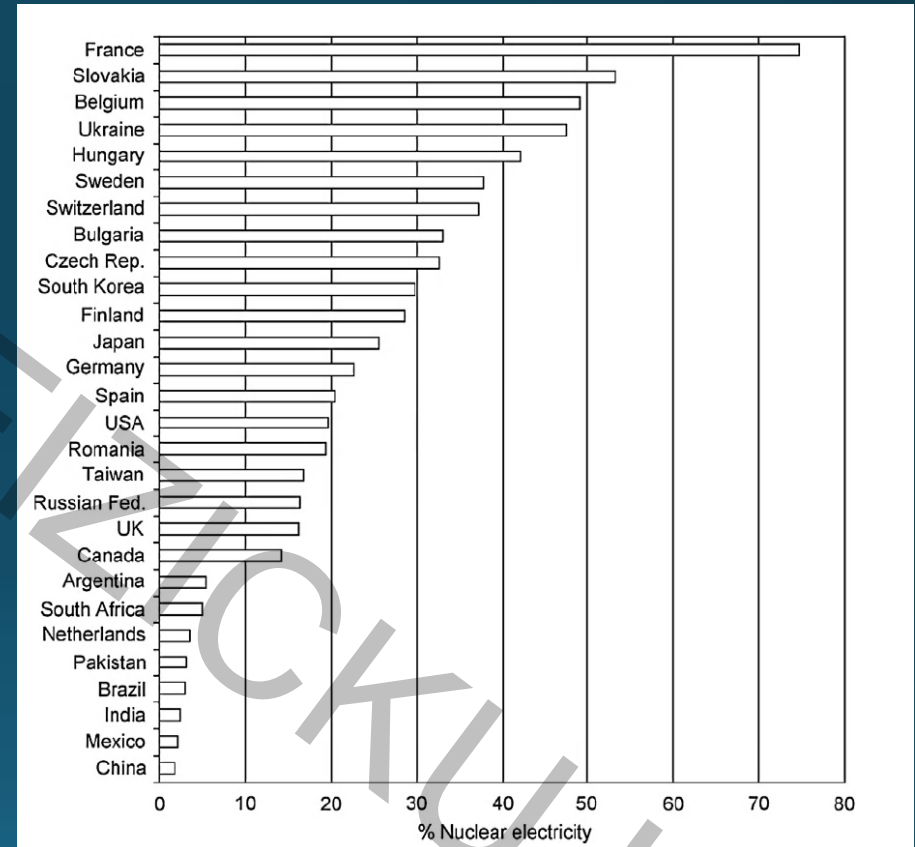


$$\Delta H = -6,67 + 2,75 \cdot 10^{-4}T \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \text{Zr} \right)$$

- Скоро сви реактори на западу, као и новији руски типови реактора имају заштитни плашт – *containment*
- Улога – да спречи продор радиоактивних материјала у околину који би настао пробојем суда реактора

Нуклеарне електране у свету

- Подаци из 2020:
- 440 енергетских реактора
 - 122 Северна Америка
 - 6 Јужна Америка
 - 186 Европа+Русија
 - 119 Далеки исток
- 55 реактора у фази изградње
- 109 планираних
- 329 у фази предлога



Акциденти на нуклеарним електранама

- 1957. Windscale (GB) пожар у гасно хлађеном графитном реактору
 - Ослобођено 700 TBq ^{131}I , 20 TBq ^{137}Cs , 3 TBq ^{89}Sr , 0,3 TBq ^{90}Sr
- 1979. Three Mile Island (PA, USA) Делимично топљење језгра реактора
- 26.04.1986. Чернобыль (СССР) експлозија и пожар на РБМК реактору.

Велике површине контаминиране фисионим производима.

11. 03. 2011. Фукушима. Цунами изазван земљотесом од 9 степени Рихтера проузроковао пад система хлађења. Локална емисија фисионих производа