

# ВРСТЕ РЕАКТОРА



- Најчешћи енергетски реактори

- Снага 200 MWe – 1500 MWe

- Четири генерације реактора

- Прва генерација – педесетих година прошлог века.

- Последњи „угашен“ 2015. (Wylfa PS, GB)

- Друга генерација-комерцијални реактори

- PWR

- ВВЕР

- CANDU

- РБМК

- BWR

- AGR

- Трећа генерација – унапређења друге генерације у погледу производње и искоришћења горива и безбедности.

- ABWR
- AP-600
- CANDU6

- III+ генерација – унапређење пасивних безбедносних мера

- BBER-1000

AP1000

- ACR-1000 (Advanced CANDU)

ESBWR

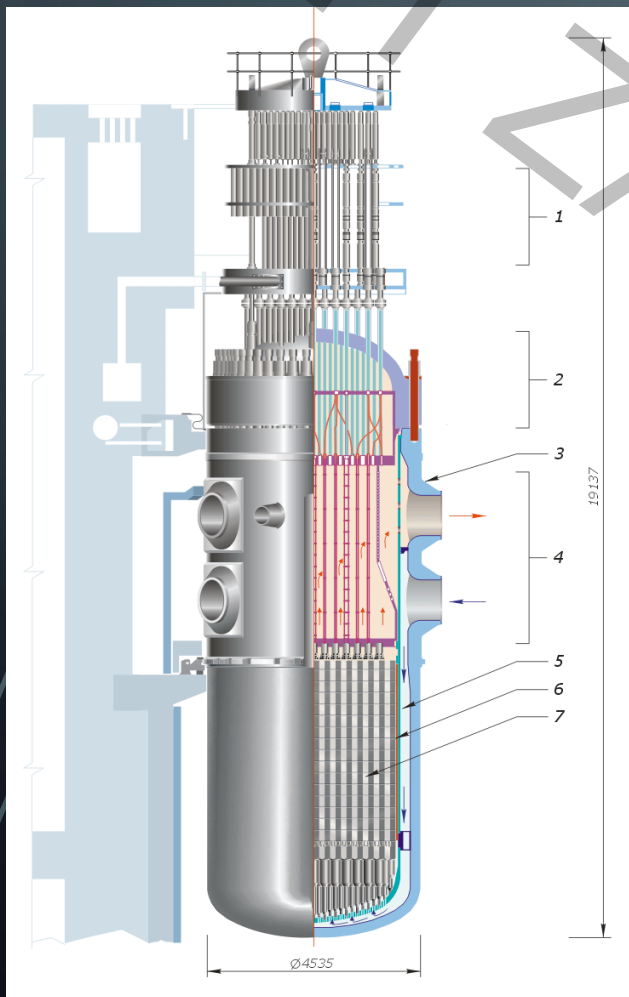
- Четврта генерација-сложена постројења која ће у свом склопу имати оплодни реактор, енергетске реактор и постројење за прераду горива

# PWR РЕАКТОРИ

- PWR, ВВЭР, РНWR (CANDU).
  - Замена горива/“генералка“ једном годишње
  - Проблеми код PWR
    - дефекти у цевима у секундарном колу хлађења
    - Дефекти између вођица контролних шипки на капи реактора
  - ВВЭР (*Водо-водяной энергетический реактор*)
    - Нема containment
    - Велика запремина
    - Хоризонтални делови за одржавање притиска
- контролне шипке  
челик + бор карбид

# ВВЭР

- Снага 400-1500 MW
- У земљама бившег Варшавског пакта, Финској и Кини



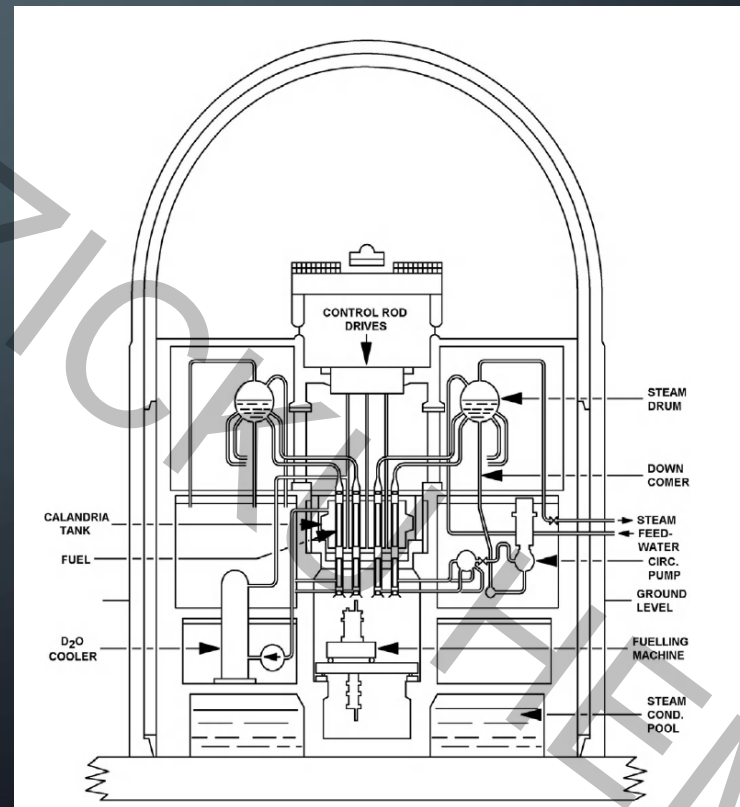
1. Механизам за покретање контролних шипки
2. Капа реактора
3. Тело реактора
4. Улаз и излаз воде за хлађење
5. Језгро реактора
6. Заштита активне зоне
7. Слогови горива
8. Контролне шипке



# BWR

- BWR, ATR, РБМК
- Негативне стране: поседује негативни „void“ коефицијент што повремено редукује снагу реактора.

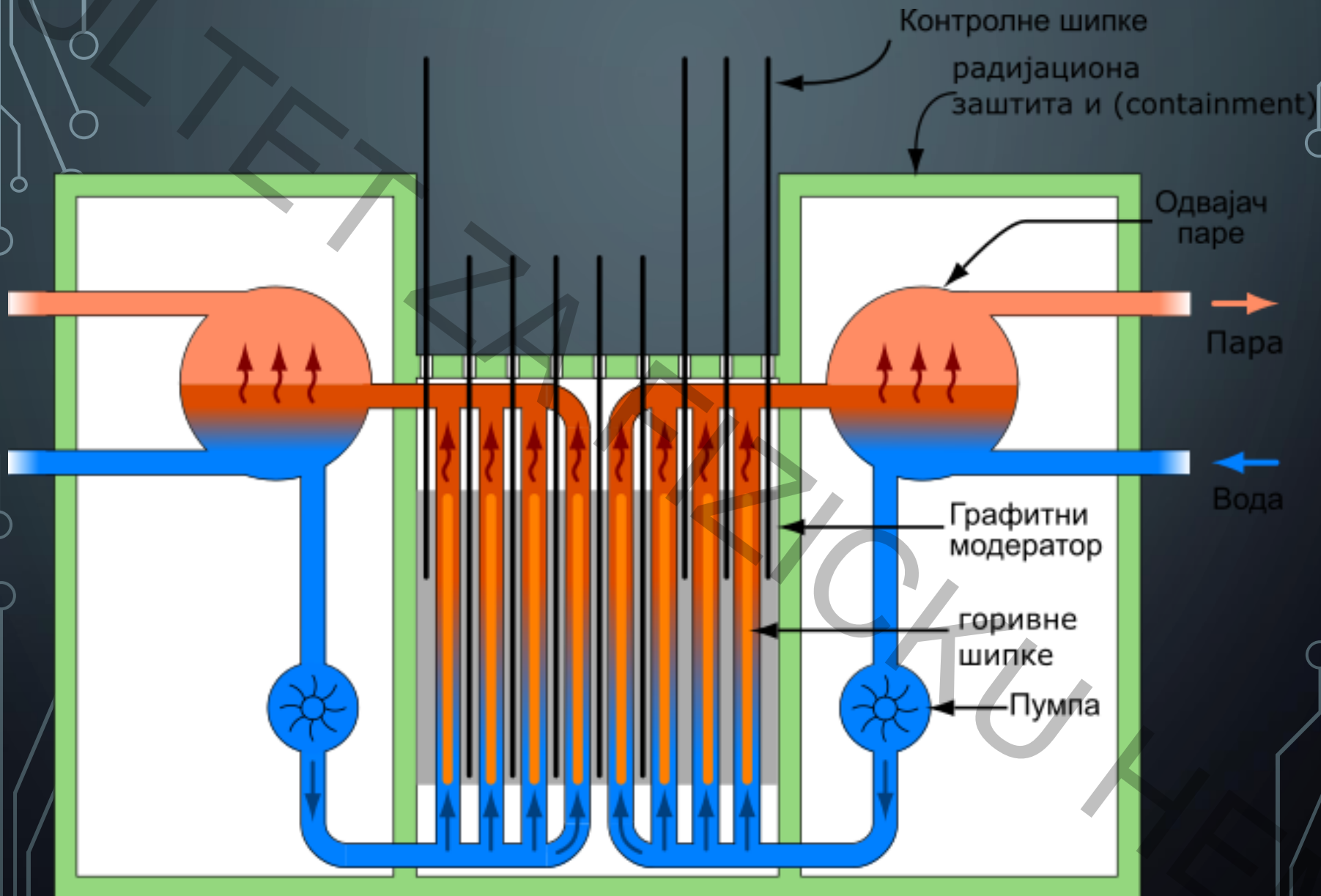
ATR (Advanced Thermal Reactor) –  
Јапански  $D_2O$  модерисани, водом  
хлађени реактор. Гориво  
мешовити оксиди  $UO_2$  и  $PuO_2$ .  
Поседује вертикалну каландрију



# РБМК

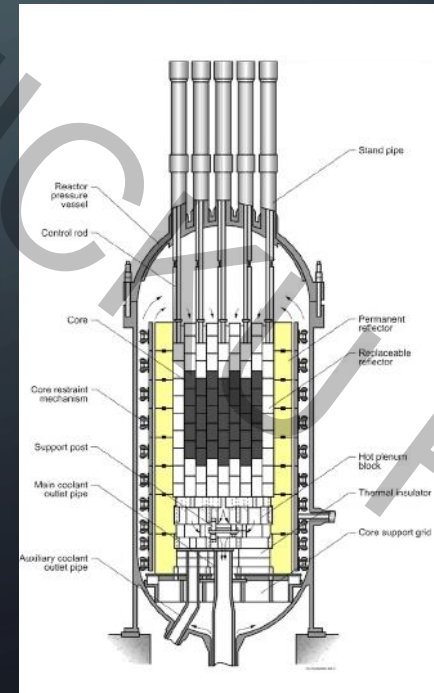
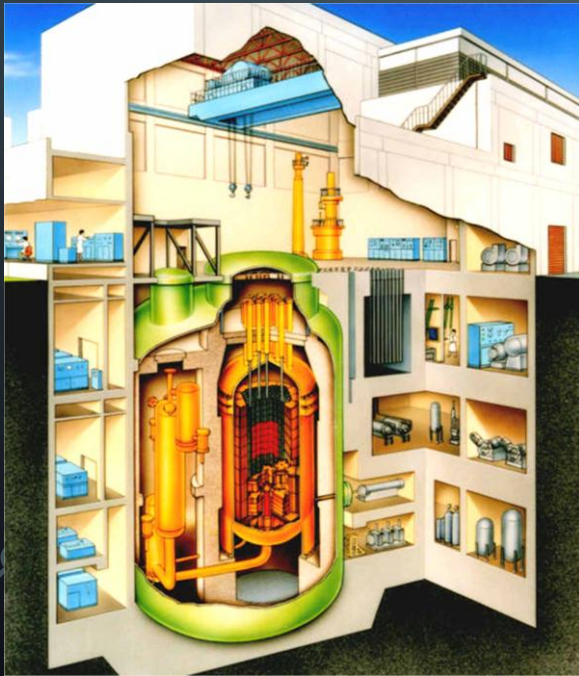
- Модератор графит, водено хлађење, слабо обогаћени уранијум
- Модуларни (канални) систем. Модул је цев од Zr-Nb легуре која садржи 2 слога горива.
- Око 1500 модула у стандардном РБМК-1000
- Модули се могу независно пунити/празнити/искључивати
- Сматрао се за један од сигурнијих типова реактора и првобитно није имао containment

# РБМК

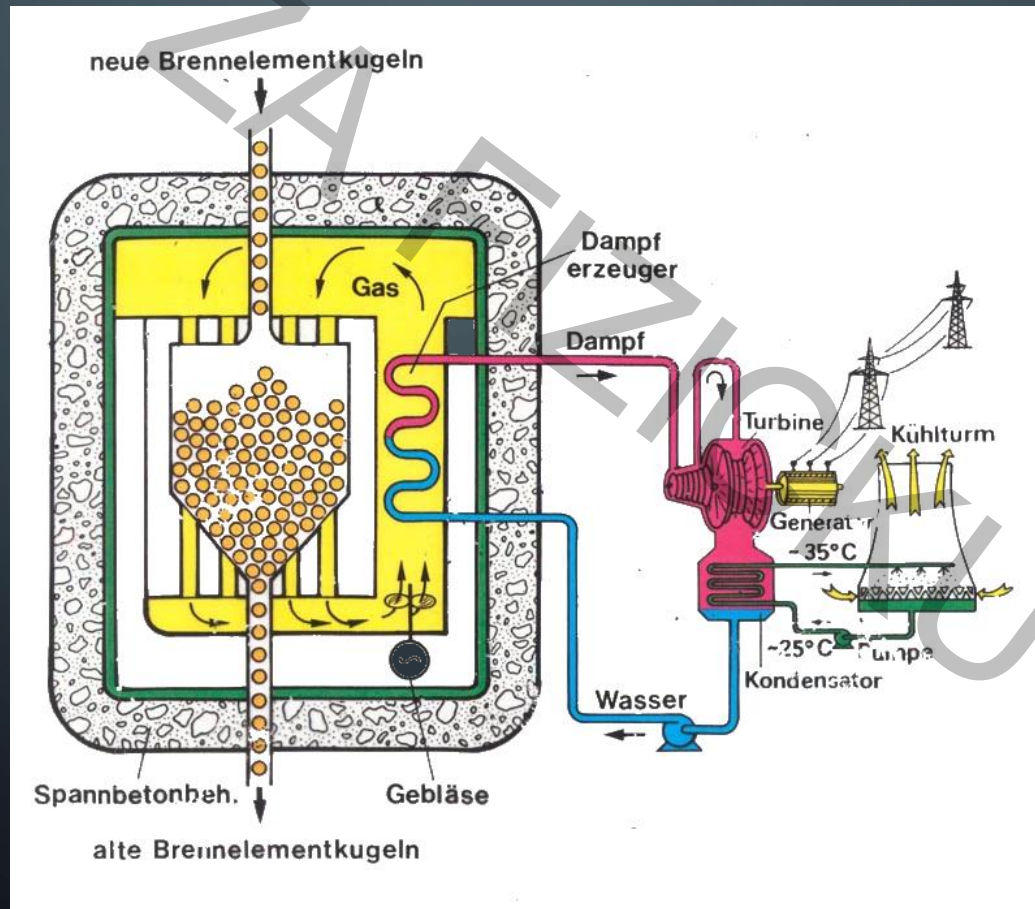


# СПЕЦИЈАЛНИ РЕАКТОРИ

- HTTR реактор – експериментални, модератор графит, хлађење хелијум гас.
- Специјално гориво базирано на торијуму
- Температура хелијума достиже  $950^{\circ}\text{C}$
- Намењен за производњу водоника у двостепеном процесу.

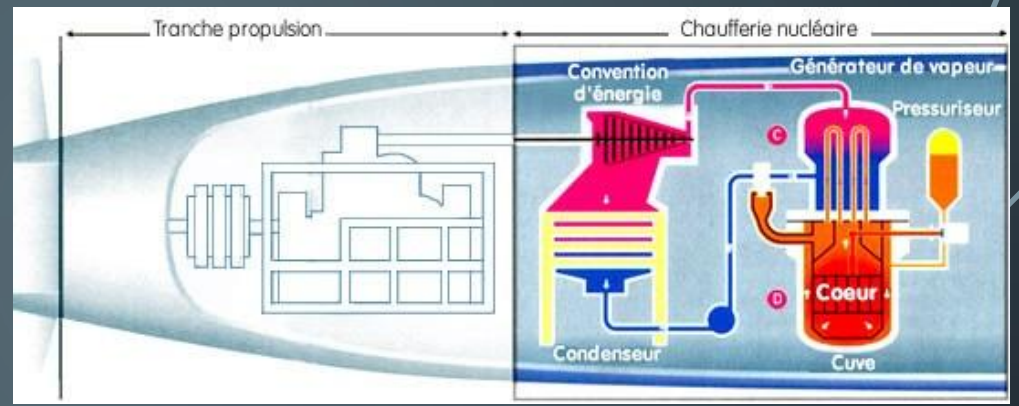
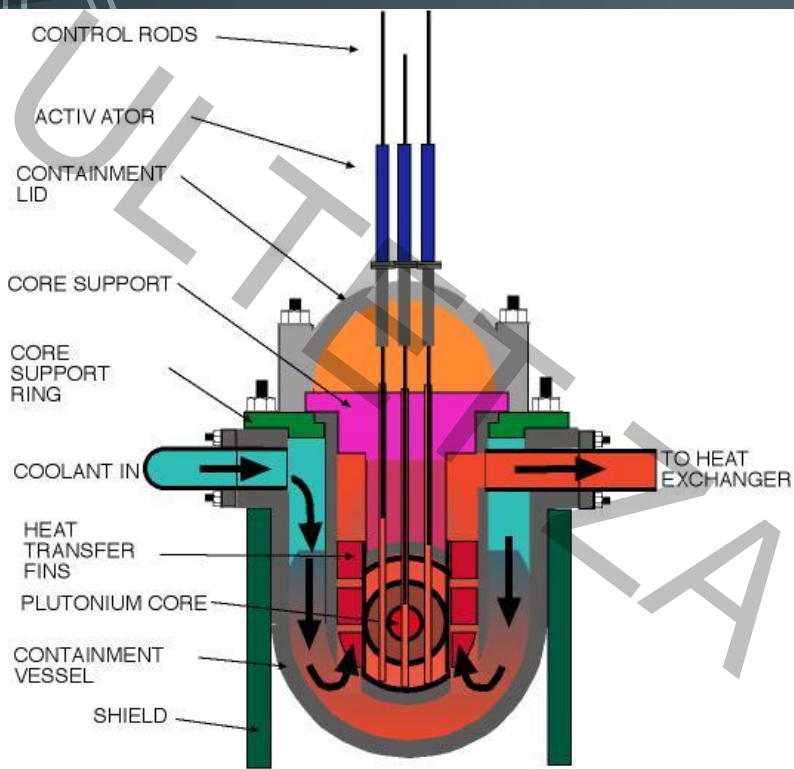


- THTR Немачки експериментални реактор, модератор графит, хлађен хелијумом
- Горивни елементи сфере ( $r=6\text{ cm}$ ) од смеше  $^{232}\text{U}/^{232}\text{Th}$  карбида распоређене у облику колоне



# ПОГОНСКИ РЕАКТОРИ

- Користе се за покретање пловила и сателита
- Углавном су PWR (ВВЕР) типа и омогућавају кретање пловила без замене горива дужи временски период.
- Гориво високообогаћени уранијум (20-50%  $^{235}\text{U}$ ) или  $^{239}\text{Pu}$  у легури са Zr. К се контролише додавањем фисионих отрова у гориво.
- Прво пловило на нуклеарни погон била је подморница USS Nautilus.
- Највеће пловило на нуклеарни погон је носач авиона USS Enterprise. Поседује 6 реактора PWR типа



# ОПЛОДНИ РЕАКТОРИ

- Подела
  - Са термалним неутронима
  - Са брзим неутронима
- Комбинација фисибилног/фертилног горива ( $^{238}\text{UO}_2 + ^{239}\text{PuO}_2$ ,  $^{233}\text{UO}_2 + ^{232}\text{ThO}_2$ )
- Захтевају тврђи неутронски спектар (област енергија 600-700 eV)
- $\eta > 2$  услов за успешан рад обих реактора
  - $^{233}\text{U}$  термалне опплодни реактори
  - $^{239}\text{Pu}$  брзи опплодни реактори

# ТЕРМАЛНИ ОПЛОДНИ РЕАКТОРИ

- Централна зона  $^{233}\text{UO}_2$ ,  $^{232}\text{ThO}_2$  у “blanket”-у
- Могуће је остварити конверзиони однос 1,06
- Експериментални реактор MSBR (Oak Ridge 1970)
  - $^{233}\text{UF}_4$ ,  $^{232}\text{ThF}_4$  у раствору  $\text{BeF}_2$ ,  $\text{ZrF}_4$  и  $\text{LiF}$
  - Предности овог система у односу на хетерогени
    - Радијациони ефекти мањи него у чврстим системима
    - Једноставна припрема горива
    - Фисиони производи се могу континуирано извлачити (хемија проблем)
    - Гориво се може континуирано додавати
    - Велики негативни температурски коефицијент - лакша контрола

# БРЗИ ОПЛОДНИ РЕАКТОР

- $^{239}\text{Pu}$  у језгру,  $^{238}\text{U}$  у “blanket”-у, Fe као рефлектор
- $\eta=2,56$
- Постојање оваквих система омогућава да се искористе залихе осиромашеног и природног уранијума.
- Поред  $^{239}\text{Pu}$  у “blanket”-у настаје и  $^{241}\text{Pu}$ .
- Примери оплодних реактора
  - BN-350 (СССР/Казахстан)  $1000 \text{ MW}_{\text{th}}$  1972-1994
  - Creys-Malville  $1240 \text{ Mw}_e$  хлађен течним натријумом ( $520^\circ\text{C}$ ) 1986-1997
- Предложени су реактори са течним оловом као хладиоцем

# Creys-Malville Super Phénix

The Worlds Reactors No. 73

Creys-Malville nuclear power station  
(Centrale Nucléaire de Creys-Malville)

Owner: Electricité de France  
Operator: Electricité de France

Multi-Elementary Reactor: Pressurized Water Reactor  
Type: Pressurized Water Reactor (PWR)

Max. Power: 2200 MW  
Capacity: 2200 MW

Year: 1977

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

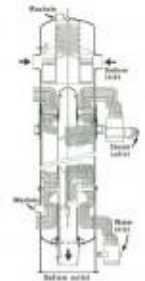
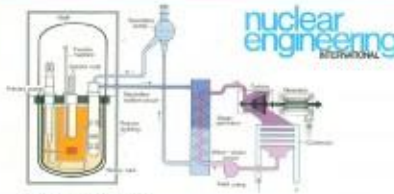
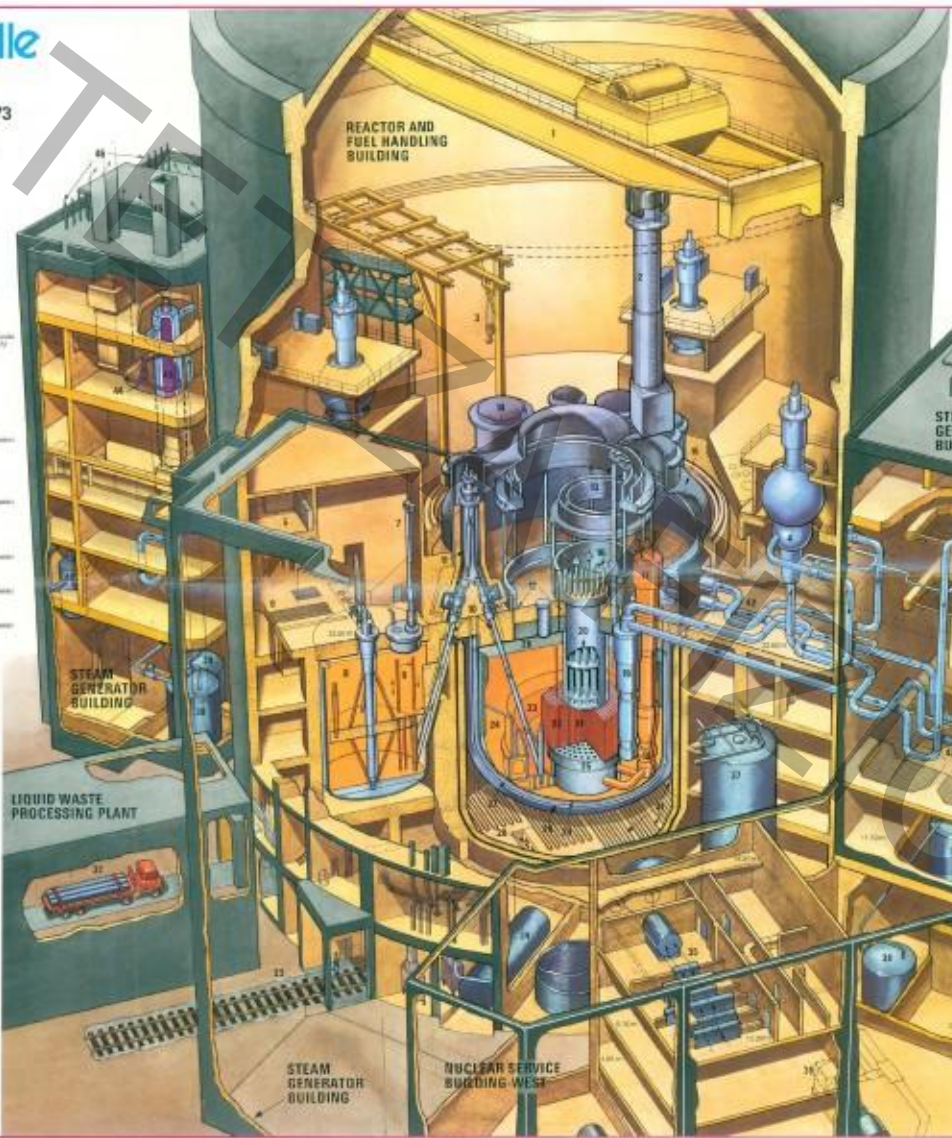
Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW

Reactor core: 2200 MW  
Reactor core: 2200 MW



1. Fuel element
2. Fuel element support structure
3. Fuel element support structure
4. Fuel element support structure
5. Fuel element support structure
6. Fuel element support structure
7. Fuel element support structure
8. Fuel element support structure
9. Fuel element support structure
10. Fuel element support structure
11. Fuel element support structure
12. Fuel element support structure
13. Fuel element support structure
14. Fuel element support structure
15. Fuel element support structure
16. Fuel element support structure
17. Fuel element support structure
18. Fuel element support structure
19. Fuel element support structure
20. Fuel element support structure
21. Fuel element support structure
22. Fuel element support structure
23. Fuel element support structure
24. Fuel element support structure
25. Fuel element support structure
26. Fuel element support structure
27. Fuel element support structure
28. Fuel element support structure
29. Fuel element support structure
30. Fuel element support structure
31. Fuel element support structure
32. Fuel element support structure
33. Fuel element support structure
34. Fuel element support structure
35. Fuel element support structure
36. Fuel element support structure
37. Fuel element support structure
38. Fuel element support structure
39. Fuel element support structure
40. Fuel element support structure
41. Fuel element support structure
42. Fuel element support structure
43. Fuel element support structure
44. Fuel element support structure
45. Fuel element support structure
46. Fuel element support structure
47. Fuel element support structure
48. Fuel element support structure
49. Fuel element support structure
50. Fuel element support structure



DUK BUIS  
1977

# ХЕМИЈСКЕ ПРОМЕНЕ У РЕАКТОРУ

- Пролаз неутрона и гама зрачења кроз воду производи бројне реактивне (укључујући и кисеоник) врсте које при повишеној температури могу да доведу до корозије.
- Елементи ослобођени из зидова реактора депонују се на горивне елементе градећи тзв. Crud (Chalk River Unknown deposits) депозите који утичу на њихово хлађење
- Код PWR може се депоновати и бор (CIPS) што може индиковати превремену замену горивних елемената
- Проблеми са корозијом се решавају додавањем хидроксида у хладиоц и/или додавањем малих количина цинка („хемија цинка“)



# ФУЗИОНИ РЕАКТОРИ

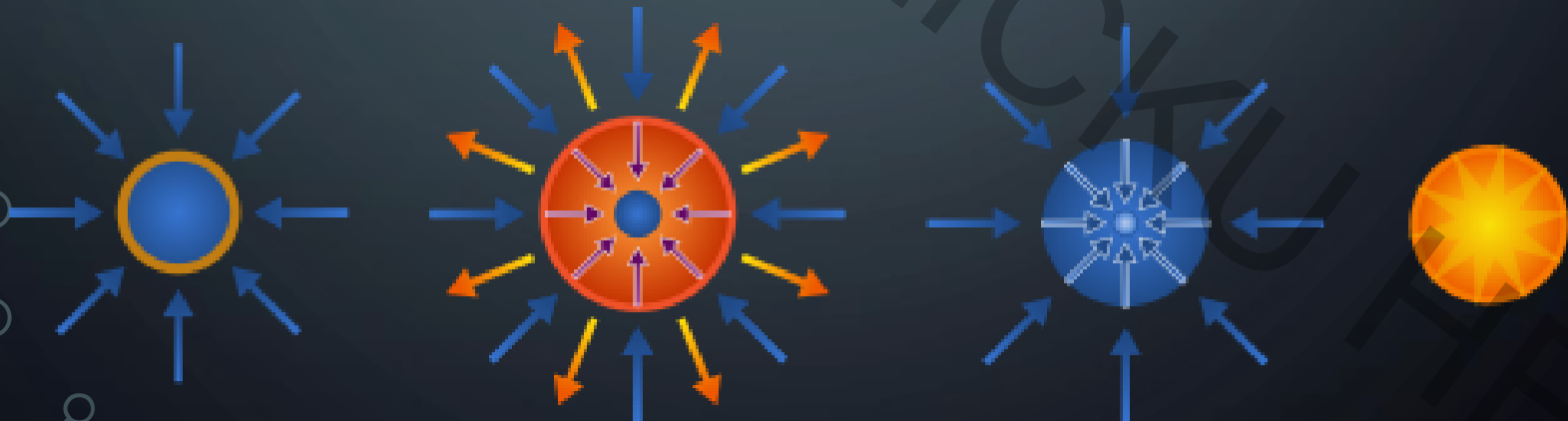
FIZICKU NEM

# ФУЗИЈА У ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИМ УСЛОВИМА

- Токамак (тороидальна камера с магнитним катодима)  
1955. (Там и Сахаров 1950 теорија)

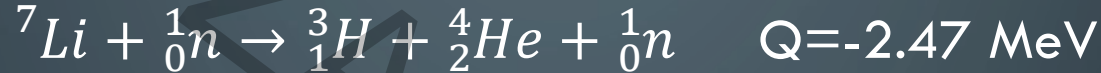


- Инерцијална конфинација



# УСЛОВИ ДОСТИЗАЊА ПРАГА РЕАКЦИЈЕ

- Тритијум неопходан за реакцију добија се оплодњом у самом фузионом реактору



- Брзина D-T реакције пропорционална је производу концентрација реактаната, ефикасног пресека и брзине честица

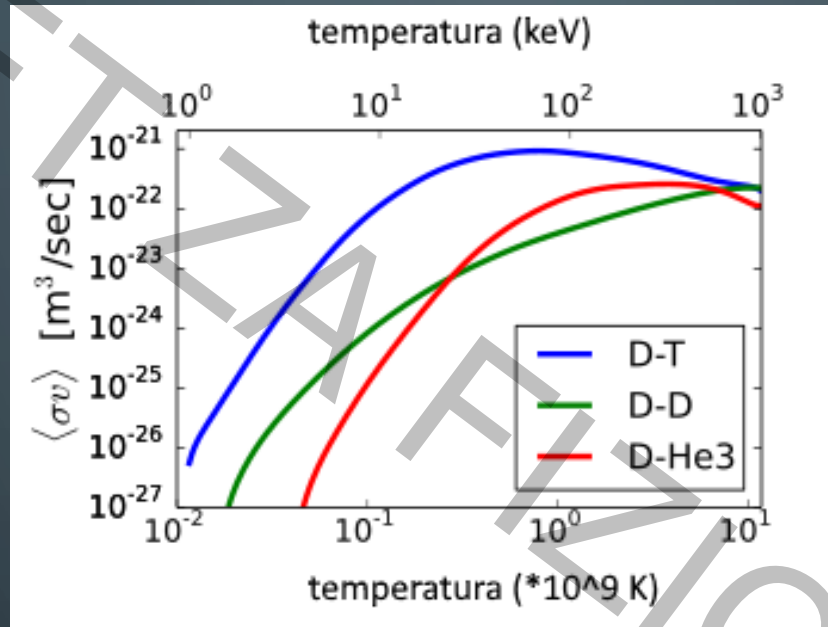
$$k = n^2 \langle \sigma v \rangle$$

n- концентрација D и T  $[D] = [T] = 10^{20} \text{ m}^{-3}$  -густина плазме

$\langle \sigma v \rangle$  –средња вредност производа ефикасног пресека и релативне брзине честица у судару

- Обе величине у производу су зависне од температуре

$$\langle \sigma v \rangle = 4\pi \left( \frac{\mu}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} \sigma(v) v \cdot e^{-\left(\frac{\mu v^2}{2kT}\right)} dv$$



- Густина фузионе снаге ослобођена у јединичној запремини хомогене плазме је

$$W_f = n^2 \langle \sigma v \rangle Q_{D-T} \text{ Mev } m^{-3} s^{-1}$$

- Време конфинације

$$\tau_c = \frac{\text{укупна енергија плазме}}{\text{брзина губитка енергије плазме у околину}} \quad (s)$$

- Производ  $\eta\tau_c$  назива се квалитет конфинације.
- Неопходан услов за фузију дат је Lawson-овим критеријумом

$$n\tau_c \geq \frac{3T}{\frac{\eta}{1-\eta} \frac{\langle\sigma v\rangle Q_{D-T}}{4} - \alpha T^{1/2}}$$

- $\eta = \eta_e \eta_g$  укупан коефицијент конверзије снаге

$\eta_e$  коефицијент конверзије снаге у електричну

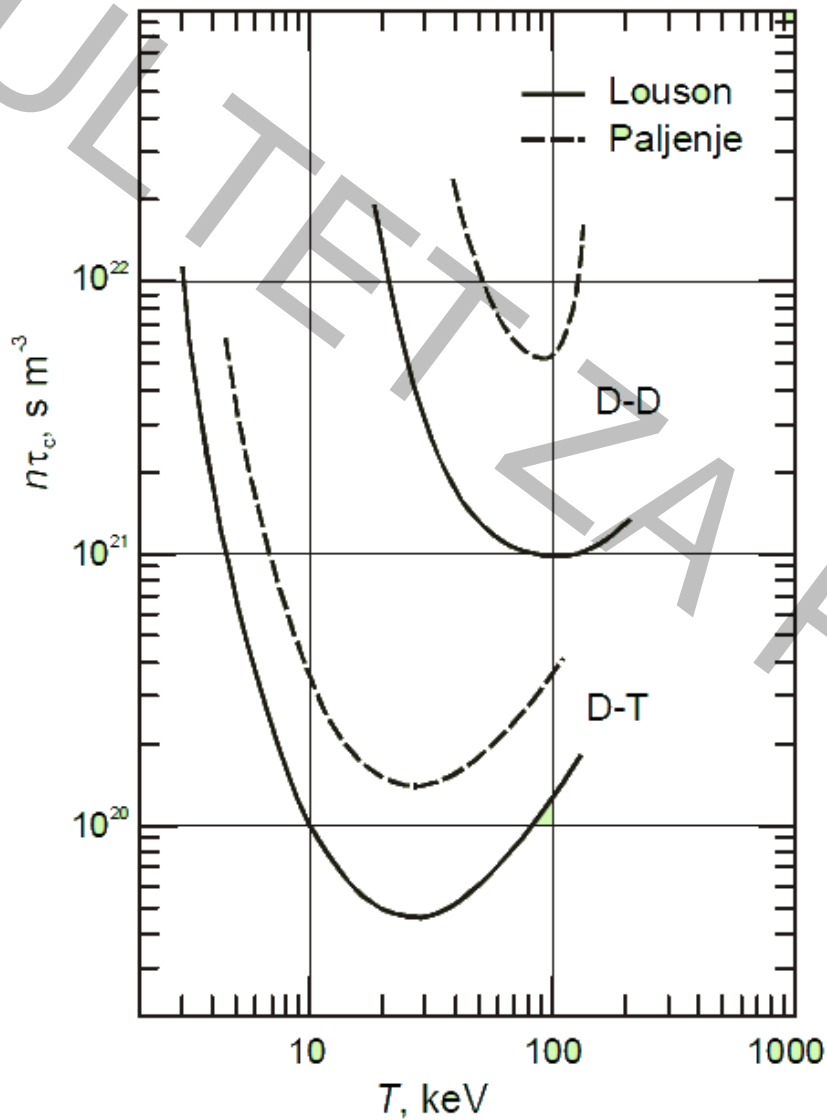
$\eta_g$  коефицијент конверзије у грејање плазме

$\alpha$ —параметар радијационих губитака услед закочног зрачења

- Лоусонов критеријум је изведен за случај кад се снага грејања континуално доводи у систем.
- Када се услов задовољи и  $T > 5 \text{ keV}$  снага фузионих алфа честица енергије  $Q$  је довољна за одржавање плазме – т.ј. Тада **плазма гори**
- **Услов горења је**

$$n\tau_c \geq \frac{3T}{\frac{\langle\sigma v\rangle Q_\alpha}{4} - \alpha T^{1/2}} \approx \frac{12T}{\langle\sigma v\rangle Q_\alpha}$$

Када је задовољена једнакост испуњен је услов паљења плазме.



Лоусонов критеријум за D-T реакцију испуњен за  $T=25 keV$  и  $n\tau_c = 7 \cdot 10^{19} sm^{-3}$

Услов паљења је испуњен за  $T=30 keV$  и  $n\tau_c = 1,5 \cdot 10^{20} sm^{-3}$

# Фузиони реактор

