

**РАДИЈАЦИОНА ХЕМИЈА И
ФИЗИКА НУКЛЕАРНИХ
РЕАКТОРА**

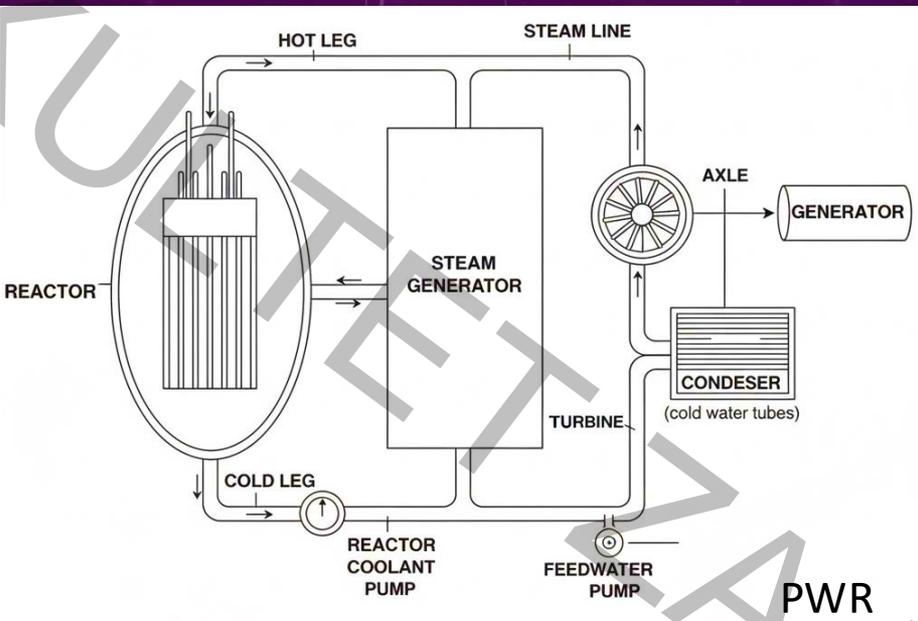
ПОДСЕЋАЊЕ – ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ФУНКЦИОНИСАЊА НУКЛЕАРНИХ РЕАКТОРА

- Нуклеарни реактори обезбеђују контролисано одвијање ланчане реакције фисије.

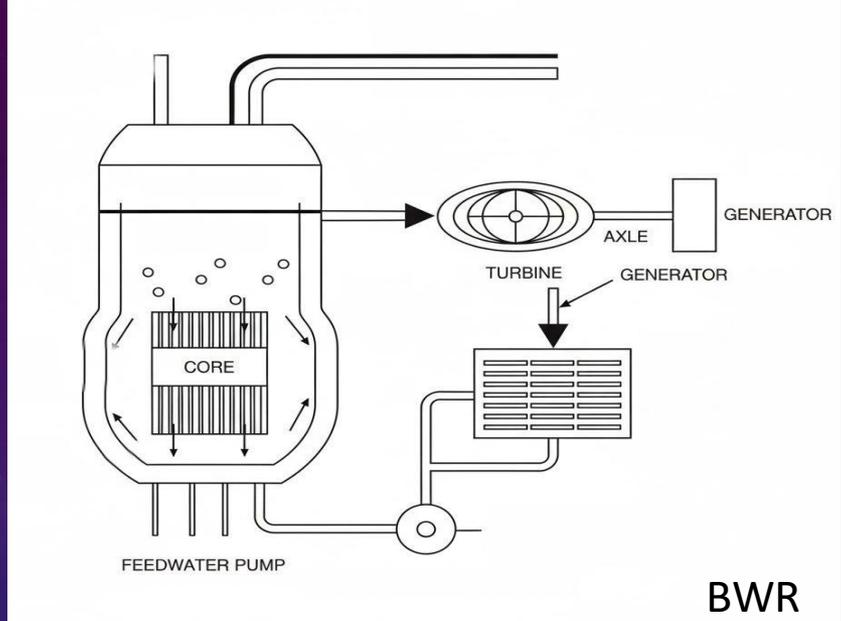


- Фисија неутронима са одвија на уранијуму обогаћеном 3-5% у ${}^{235}\text{U}$ (најчешћи хемијски облик UO_2), природном уранијуму, ${}^{239}\text{Pu}$ и смеси уранијум и плутонијум оксида.
- Гориво се најчешће прави у облику пелета који се пакују у кошуљице од легуре циркон-2 или нерђајућег челика.
- Због високог ефикасног пресека најпогоднији су термални неутрони који се добијају успоравањем примарно насталих у фисији.
- Као медијум за успоравање могу да служе лака вода, тешка вода и графит.

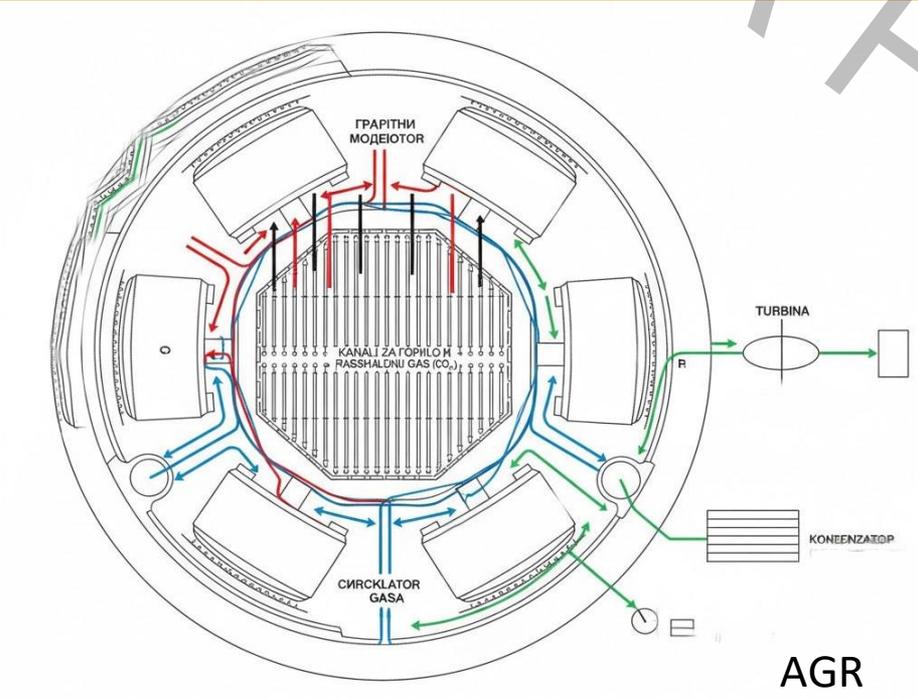
- Пошто се у току реакције фисије ослобађа велика енергија (~ 200 MeV) гориву је потребно хлађење. У већини случајева модератор је истовремено и хладилац. Хладилац непрестано циркулише кроз реактор.
- Радионуклиди који настају у процесу фисије имају високу активност, односно емитују електроне и пратеће гама зрачење.
- У AGR реактору као модератор се користи графит, а хладиоци су угљен диоксид или хелијум.
- Код реактора нове генерације као хладиоци служе течни натријум или олово
- Ланчана реакција се одвија у суду од реакторском суду од нерђајућег челика дебљине 20-30 cm. Контролише се помоћу шипки које садрже елементе који имају велики ефикасни пресек за захват неутрона.



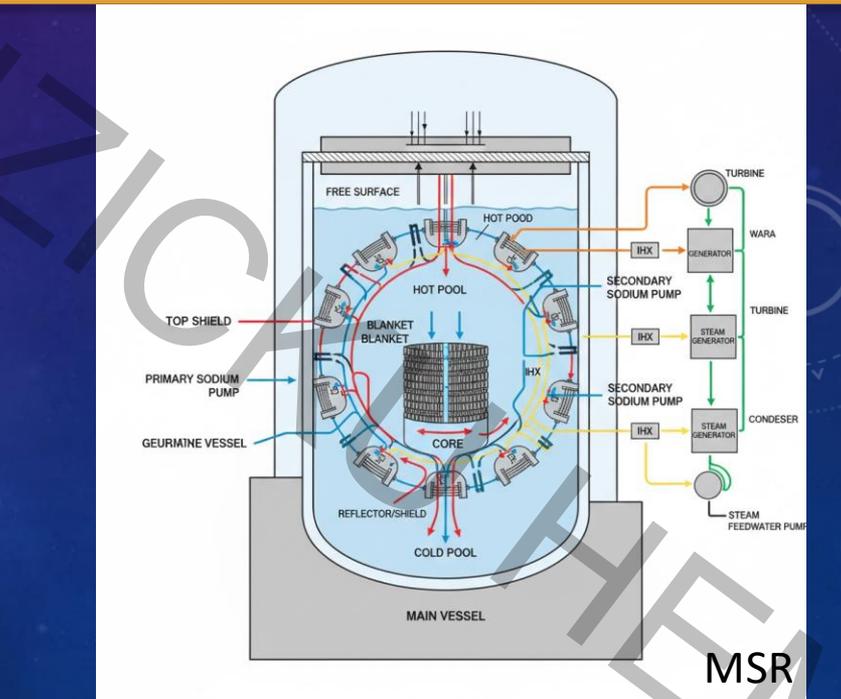
PWR



BWR



AGR



MSR

ОСНОВЕ РАДИЈАЦИОНЕ ХЕМИЈЕ РЕКАТОРА

- Нуклеарни реактори раде/генеришу екстремно окружење где су материјали и хладиоци симултано изложени великим флуксевима гама и неутронског зрачења, високој температури и агресивним хемијским врстама.
- Овакви услови стварају интензивне јонизације, ексцитације и атомске помераје, који у међусобним интеракцијама доводе до комплексних хемијских процеса и у течној и у чврстој фази.
- Посебно су значајни процеси у легурама које чине облоге горива и реакторски суд код којих долази до радијационо индукованих дефеката, дислокацијских петљи, сегрегација и фазних трансформација.
- Већина ових процеса се одвија и у гориву нуклеарних реактора.

ФИЗИЧКОХЕМИЈСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ХЛАДИОЦА У РЕАКТОРУ

Hydrogen (cm ³) (STP)/kg H ₂ O ^{a)}	25 - 50
chlorides (mg/kg)	< 0.15
fluorides (mg/kg)	< 0.15
dissolved oxygen (mg/kg)	< 0.01
lithium (mg/kg)	consistent with station lithium program

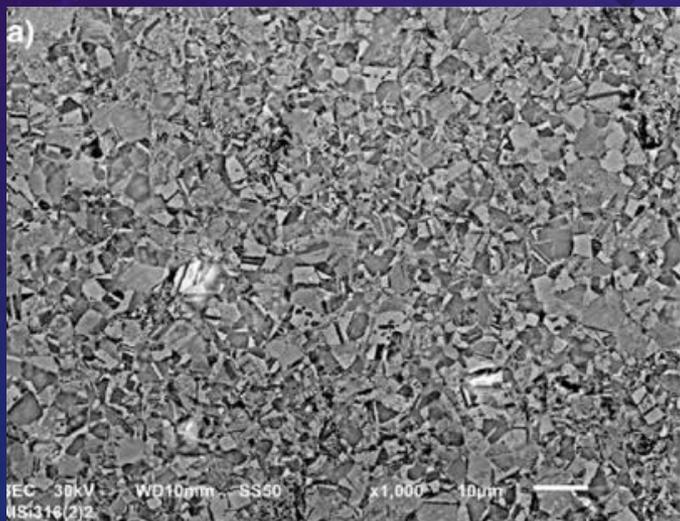
^{a)} STP, standard temperature and pressure (0 °C, atm)

Table 2. Specifications of reactor water quality for PWR's of VVER-440 and VVER-1000 type (Rieβ 1993).

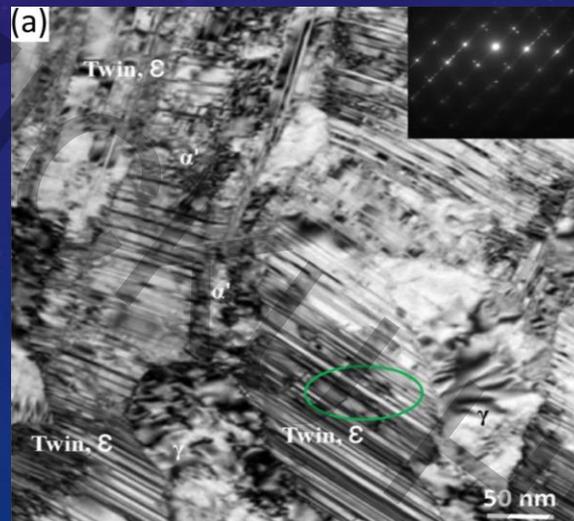
Indicator	Values	
	VVER-440	VVER-1000
pH (25°C)	6.0 - 10.2	5.7 - 10.2
K ⁺ , L ⁺ , N ⁺ (mmol/kg) (depending on H ₃ BO ₃ concentration)	0.05 - 0.45	0.05 - 0.45
NH ₃ (mg/kg)	> 5.0	> 5.0
hydrogen (cm ³ /kg)	30 - 60	30 - 60
chlorides and fluorides (μg/kg)	≤ 100	≤ 100
H ₃ BO ₃ (g/kg)	0 - 9.0	0 - 13.5
oxygen (μg/kg)	≤ 5	≤ 5
copper (ng/kg)	< 20	< 20
iron (ng/kg)	< 200	< 200

ЛЕГУРЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ ЗА ИЗРАДУ РЕАКТОРСКОГ СУДА И ОБЛОГА ГОРИВНИХ ЕЛЕМЕНАТА

- Нисколегирани челик (угљеник, хром, манган у проценти 0,01-0,05%)
- Аустентични челик (хром, никл, молибден 16-20%)
- Тип нерђајућег челика 306L или 314L
- Циркалој легура - облога горива (98% цирконијум + 1,2-1,7% Sn, 0,07-0,20% Fe, 0,15% Cr и 0,03 – 0,08% Ni)



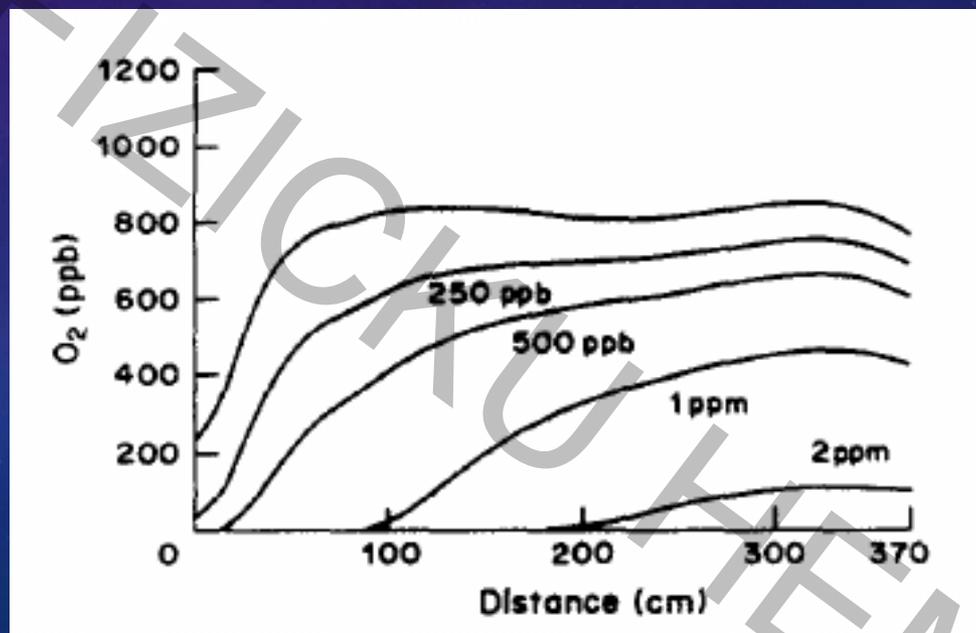
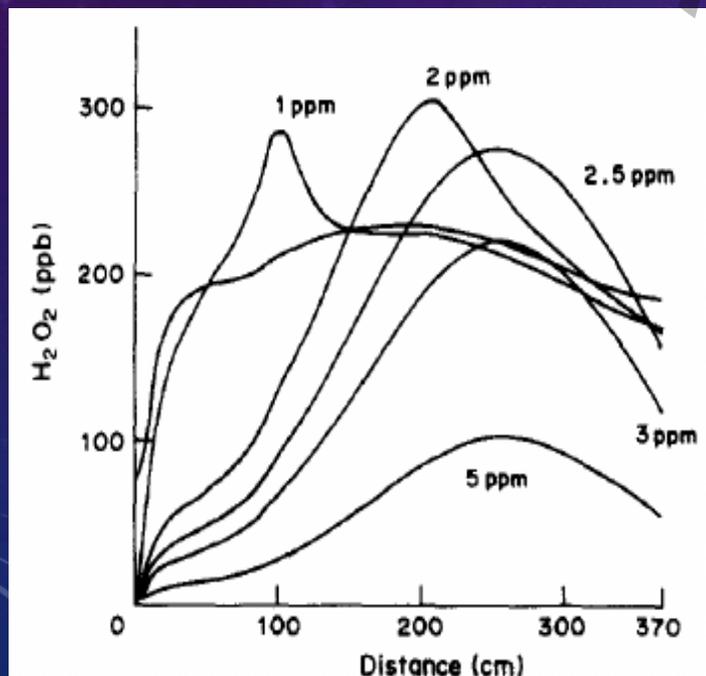
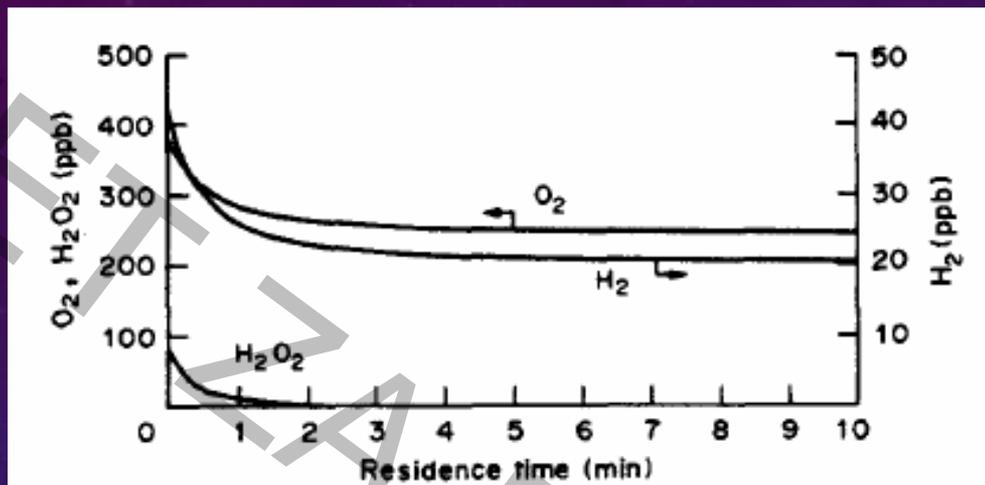
SEM аустентичног челика



УЛОГА АДТИВА У НУКЛЕАРНОМ РЕАКТОРУ

- У циљу контроле реактивности реактора, рН и концентрације реактивних врста у хладилац се, додају борна киселина, LiOH или KOH или водоник.
- Ови адитиви (посебно борна киселина) могу интераговати са реактивним врстама попут хидроксилних и супероксидних радикала.
- LiOH утиче на пораст рН средине, што стабилизује оксидни слоја на зиду реактора и облози горива и спречава корозију
- Водоник се додаје ради елиминације кисеоничних реактивних врста.
- Нечистоће у виду хлорида и сулфата, чак и у најмањим концентрацијама потпомажу локализовану корозију .
- ЦИЉ – спречити корозију и активацију производа корозије.

УТИЦАЈ ВОДНИКА НА УКЛАЊАЊЕ РЕАКТИВНИХ ВРСТА



КОРОЗИЈА У ДЕЛОВИМА РЕАКТОРА

- Корозија у структурним материјалима начињеним од нерђајућег челика доводи до превођења јона метала и честица металних оксида у раствор.
- При проласку ових компоненти кроз језгро реактора долази до њихове активације, и представљају допринос пољу зрачења реактора.
- Касније може доћи до њихове депозиције на структурне компоненте реактора или на горивне елементе.
- Посебно је критично последње јер њихово гомилање на облози горива омета локални трансфер топлоте и тиме доводи до локалног прегревања или чак кључања.
- У овим структурама може доћи до везивања бора/борне киселине што за последицу има редукцију неутронског флукса и субоптималну модерацију

- Реактивне врсте које су настале унутар пора депозита доводе до промене локалне хемије, тако што долази до њихове редукције на металним површинама.
- Локално прегревање може довести до пуцања облоге горива и ослобађања фисионих продуката у хладиоц.
- Праћење концентрације продуката корозије и евентуално присутних фисионих производа служи за процену структурног интегритета горивних елемената.

РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ И ХЕМИЈА ДЕФЕКТА У СТРУКТУРНИМ МАТЕРИЈАЛИМА

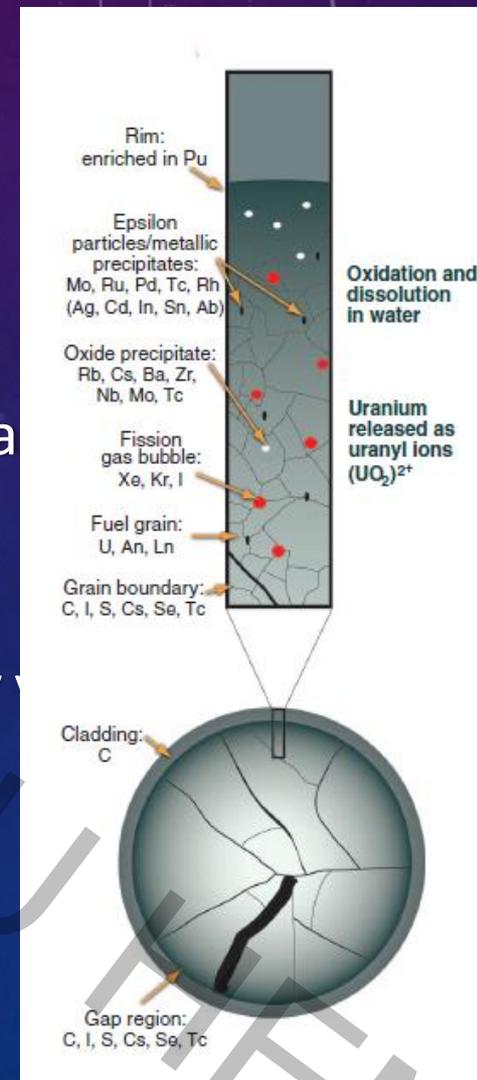
- Радијационо индукована сегрегација у нерђајућем челику и другим структурним легурама је кључна последица излагања великим флуксевима неутрона и гама зрачења.
- До ње долази због радијационо појачане дифузије тачкастих дефеката који на границама зрна доводе до промена у локалном саставу легура.
- У аустентичним челицима (који се користе у модерним реакторима) на границама зрна доводе до миграције хрома и никла тако да долази до осиромашења у првом и обогаћења у другом (али и у другим елементима).
- Ово за последицу има смањење отпорности на корозију што може да доведе до деформитета и пуцања горивних елемената.

Радијационо оштећење, присуство реактивних врста у раствору и корозија су међусобно јако повезани:

Зрачење модификује микроструктуру, популацију дефеката и сегрегацију, док утицаји из окружења модификују стабилност дефеката, усвајање водоника и понашање оксидног филма

РАДИЈАЦИОНА ХЕМИЈА НУКЛЕАРНОГ ГОРИВА И ПРОДУКАТА ФИСИЈЕ

- Доминантно гориво у конвенционалним нуклеарним реакторима је UO_2 . Као производ фисије настаје велики број радионуклиди у чврстом и гасовитом стању, као и трансуранијумски елементи.
- Због разлике у хемијском понашању у току рада реактора долази до њиховог нагомилавања у различитим деловима горивних елемената:
 - гасови ће се нагомилавати у пукотинама које настају у горивним пелетима (гасни мехурови).
 - У зависности од хемијског потенцијала остали елементи ће се концентрисати у различитим зонама пелета.



- У зависноти од њихове величине и наелектрисања метални производи фисије могу формирате чврсте растворе, преципитате или секундарне фазе.
- Дистрибуција ових производа пре свега зависи од температурског градијента унутар горива, радијационо индукованих дефеката у гориву и редокс услова.
- Продукти радиоллизе резидуалне воде су способни да модификују оксидационо стање уранијума у гориву. Међутим водоник који настаје као финални производ првог процеса може у многоне успорити овај процес (опрез!).
- Обзиром на своју занемарљиву хемијску активност радиоизотопи племенитих гасова из мехурастих дефеката могу мигрирати до границе облога- гориво и у случају деформација облоге напустити горивни елемент.

ЕФЕКАТ ВОДОНИКА НА ПОВЕЋАЊЕ КРТОСТИ МАТЕРИЈАЛА У РЕАКТОРУ

- У случају када дође до повећане продукције водоника у хладиоцу, може доћи до радијационо потпомогнуте адсорпције на металним површинама, што доводи до промена у микроструктури површине и повећања кртости материјала.
- Адсорпција на облози горива доводи до формирања хидрида цирконијума, кртости или деформација. (опрез!).

РАДИЈАЦИОНА ХЕМИЈА РЕАКТОРА СА ГАСНО И ТЕЧНИМ МЕТАЛОМ ХЛАЂЕНИМ РЕАКТОРИМА

- Иако у овим реакторима нема присуства воде, неутрони и гама зрачење могу произвести дефекте у модератору и гориву.
- Изражено у случајевима када се као хладилац користи угљен диоксид.
- У металом хлађеним реакторима може доћи до значајне активације метала, што доводи до повећања поља зрачења.