



R I S E - P U

Частина 1
Радіаційна безпека:
фізичний аспект



1. Фізична природа та джерела іонізуючого випромінювання
2. Склад атомного ядра. Характеристики ядер. Ізотопи та ізобари. Радіоактивність, радіоактивне випромінювання. Закон радіоактивного розпаду. Основні закономірності альфа- та бета-розпадів, гамма-випромінювання ядер. Фізичні основи взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною: передача енергії, іонізація. Лінійна передача енергії, Взаємодія альфа-частинок із речовиною. Взаємодія бета-частинок із речовиною. Проходження гамма-квантів через речовину. Взаємодія нейтронів із речовиною. Принципи реєстрації заряджених частинок та гамма-квантів.
3. Техногенні радіоактивні джерела. Бета-, альфа-, гамма- та рентгенівські джерела; ізотопні нейтронні джерела; закриті джерела; відкриті джерела та генератори ізотопів; загальні засади безпеки джерел випромінювання; виробництво радіоізотопів
4. Ядерна зброя. Фактори ураження. Радіоактивні опади.
5. Ядерні реактори: огляд реакцій ядерного поділу та термоядерного синтезу; уповільнення нейтронів; нейтрони, коефіцієнт розмноження, критичність; основні елементи ядерного реактора; типи реакторів; дослідні реактори; установки ядерного паливного циклу. Джерела випромінювання в активній зоні реактора та в технологічному контурі. Викиди АЕС в атмосферу. Матеріали для захисту від нейтронного випромінювання.
6. Генератори випромінювань. Генерація заряджених частинок: -лінійні прискорювачі; бетатрони; циклотрони Генерація рентгенівського випромінювання: низькоенергетичні рентгенівські установки; лінійні прискорювачі; інші установки; принципи та спектри; фільтрація та якість пучка Генерація нейтронів: (d, n) реакції та (p, n) реакції; генерація нейтронів для нейтронної терапії Застосування іонізуючого випромінювання в медицині, промисловості та сільському господарстві
7. Основи радіаційної безпеки космічних польотів. Радіаційні умови в космічному просторі, Галактичні та Соняні космічні промені. Радіаційні пояси Землі. Особливості радіаційного захисту в космосі. Стандарти радіаційної безпеки космічних польотів. Забезпечення радіаційної безпеки в авіації та космічних польотах.
8. Детектування радіоактивного випромінювання
9. Активність та одиниці її вимірювання. Питома, питома об'ємна та питома поверхнева активність. Базові, нормовані та операційні величини в радіаційній безпеці. Експозиційна, поглинена, еквівалентна та ефективна дози опромінення. Потужність дози. Індивідуальна та колективна дози опромінення, очікувані дози опромінення. Дозиметричні величини опромінення (потужність); керма (потужність); передана енергія; поглинена доза (потужність); лінійна передача енергії (ЛПЕ); лінійна енергія; доза на орган. Величини радіаційного захисту. Еквівалентна доза (потужність); ваговий множник випромінювання (w_R); ефективна доза, тканинний ваговий множник (w_T); операційні величини: еквівалент амбієнтної дози; еквівалент спрямованої дози; еквівалент індивідуальної дози; очікувана доза.
10. Прилади радіометричного та дозиметричного контролю. Газонаповнені детектори. Іонізаційні камери з вимірами струму; інтегруючі камери; іонізаційна камера високого тиску; екстраполяційні камери; пропорційні камери; лічильники Гейгера-Мюллера Сцинтиляційні детектори. Тверді та рідкі сцинтилятори; гасіння. Напівпровідникові детектори. Фотографічні емульсії. Термолюмінесцентні детектори. Ядерні трекові детектори. Нейтронні детектори. Детектори, що використовують (n, γ) або (n,p) реакції, активацію. Детектори з отриманням зображення.
11. Рівень природного радіаційного фону. Проблема радону. Техногенно змінений радіаційний фон.

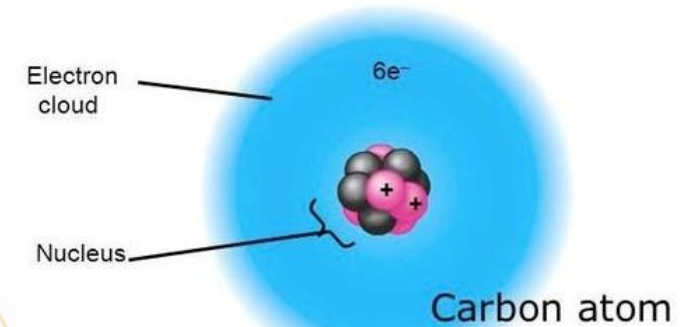
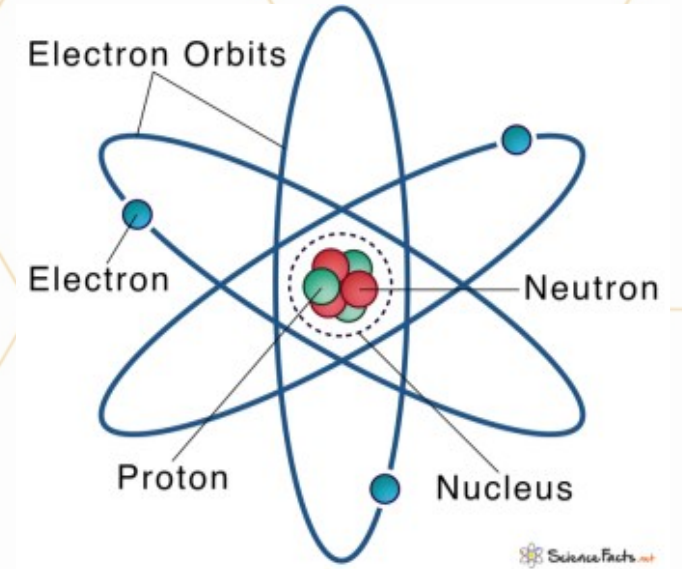


Основною одиницею речовини є атом.

Відповідно до планетарної моделі атома, яку описано Ернестом Резерфордом і Нільсом Бором у 1911 році, атом складається з позитивно зарядженого ядра, оточеного негативно зарядженими оболонками. **Ядро** містить протони і нейтрони. Ядро у цілості утримують ядерні сили. Електрони утворюють оболонки навколо ядра, які знаходяться на структурованих орбітах.

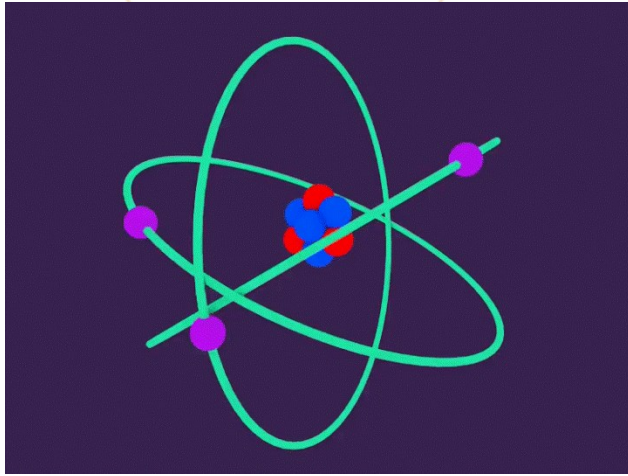
Протон (p^+) заряджений позитивно і знаходиться в ядрі атома. Кількість протонів визначає номер хімічного елемента.

Нейтрон (n) має нульовий заряд і знаходиться в ядрі атома.



6 $+$ Protons } **Mass**
6 \bullet Neutrons } **number = 12**
6 $-$ Electrons





Електрони (e^-) заряджені негативно та рухаються по орбітах із певними рівнями енергії навколо ядра.

Атом є електрично нейтральним, якщо загальний заряд електронів дорівнює повному заряду протонів.

Електрони зв'язані з позитивно зарядженим ядром електростатичним притяганням.

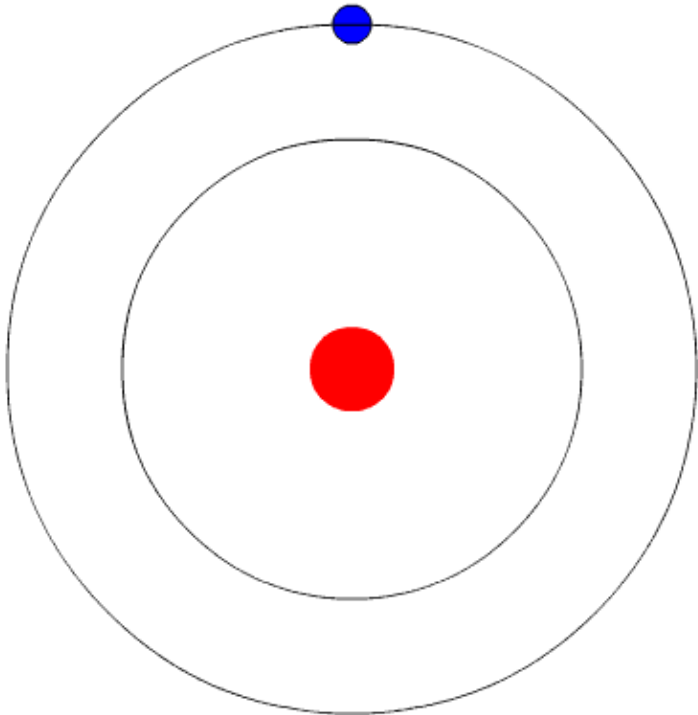
Кількість електронів і протонів визначає загальний електричний заряд атома.

Термін *іон* використовується для визначення атомів або груп атомів, які мають сумарний позитивний або негативний електричний заряд.

Енергія частинок (протонів, нейтронів, електронів) зазвичай подається в електрон-вольтах (eV). Електрон-вольт визначається як енергія електрона, який був прискорений через електронний потенціал в один вольт. eV – це дуже мала кількість енергії, тому використовуються keV (тисячі електронвольт) і MeV (мільйони електронвольт).

Енергія кванта видимого світла становить близько 2-3 eV.

Зміна енергії електрона можлива внаслідок опромінення або поглинання атомом енергії у вигляді електромагнітних хвиль.



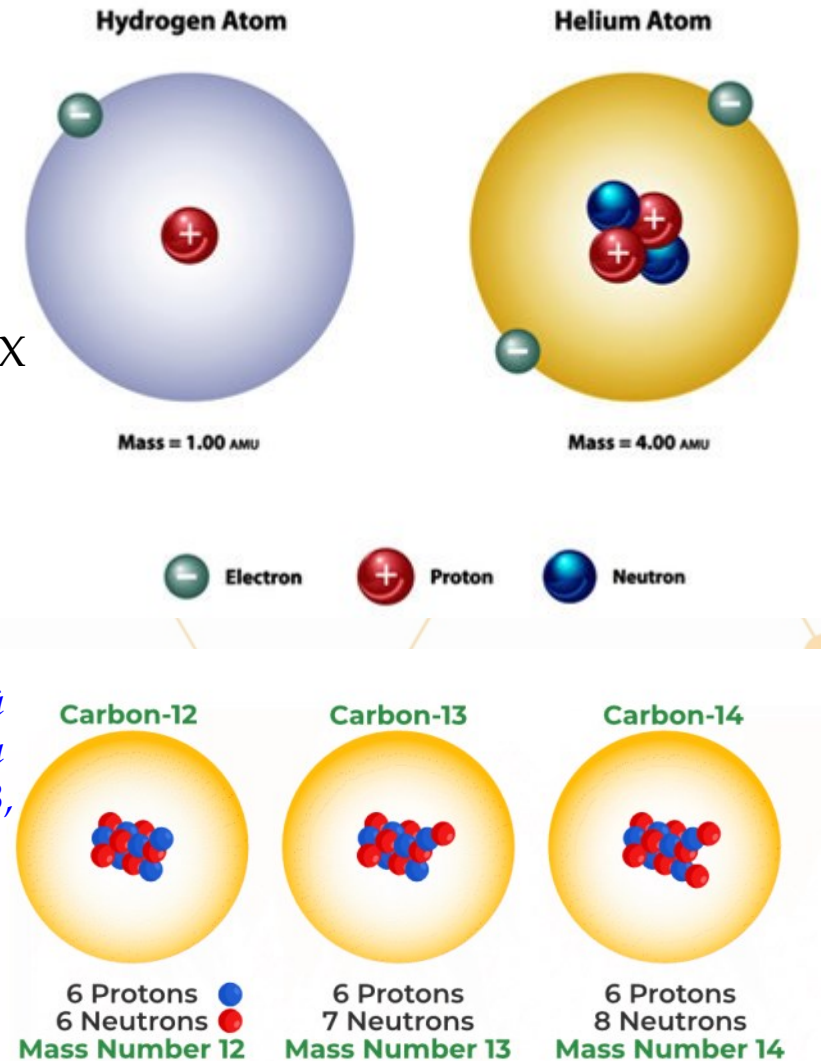
Кількість протонів у ядрі елемента називається атомним номером (Z). Всі атомні номери є цілими числами. Наприклад, атом водню має один протон в ядрі, тому атомний номер водню дорівнює 1. Атом гелію має два протони в ядрі, що означає, що атомний номер 2. Уран має дев'яносто два протони в ядрі, отже, має атомний номер 92.

Нуклід можна описати за допомогою хімічного символу, з масовим числом, записаним у вигляді надрядкового символу у верхньому лівому куті символу: ${}^A X$ де: X = символ елемента, A = масове число (сума кількості протонів (Z) та кількості нейтронів (N)). Наприклад, позначення для урану-238 буде наступне ${}^{238}\text{U}$.

Атоми, які мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, називаються **ізотопами**. Ізотопи мають **однакові хімічні властивості**, проте ядерні властивості можуть суттєво відрізнятися.

Масове число можна використовувати разом з назвою елемента, щоб визначити, про який ізотоп елемента йдеться. Якщо ми говоримо про ізотоп вуглецю з масовим числом 12, ми можемо написати його як Карбон-12. Якщо ми маємо на увазі ізотоп з масовим числом 13, ми записуємо його як Карбон-13.

Ізобари - це атоми (нукліди) різних хімічних елементів, які мають однакову кількість нуклонів. Відповідно, ізобари відрізняються атомним номером (або кількістю протонів), але мають однакове масове число. Прикладом серії ізобар є ${}^{40}\text{S}$, ${}^{40}\text{Cl}$, ${}^{40}\text{Ar}$, ${}^{40}\text{K}$ і ${}^{40}\text{Ca}$. Хоча ядра цих нуклідів містять 40 нуклонів, вони містять різну кількість протонів і нейтронів.



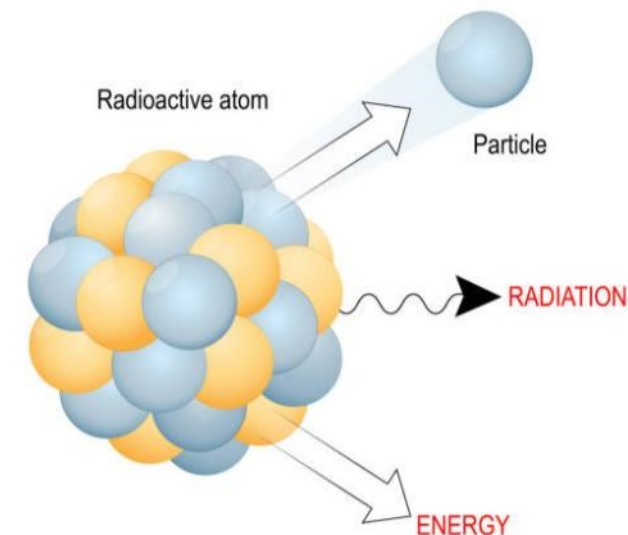
Лише певні комбінації нейтронів і протонів призводять до утворення стабільних атомів. Якщо на певну кількість протонів припадає забагато або замало нейтронів, ядро, що утворюється, матиме надлишкову енергію.

Нестабільний атом стане стабільним, випускаючи надлишок енергії у вигляді частинок або енергії (квантів).

Це випромінювання частинок або енергії з ядра називається **радіоактивним випромінюванням**. Ці нестабільні атоми також відомі як радіоактивні матеріали.

Властивість певних нуклідів спонтанно випромінювати радіоактивне випромінювання називається радіоактивністю. (Для позначення цих радіоактивних нуклідів був винайдений термін *радіонуклід*).

Існує близько 200 стабільних нуклідів і понад 1100 нестабільних (радіоактивних) нуклідів.



Випромінювання частинки або енергії (електромагнітне випромінювання) з метою досягнення більш стабільної конфігурації зазвичай призводить до утворення нового елемента. Після цього перетворення ядро, як правило, стає більш стабільним. Коли енергія ядра зменшується, кажуть, що ядро розпадається. **Радіоактивний розпад** - процес, за допомогою якого ядро спонтанно перетворюється.

Час, необхідний для розпаду половини початкової популяції радіоактивних атомів, називається **періодом напіврозпаду**.

Стала радіоактивного розпаду (λ) - це характеристика нестабільних радіонуклідів, які спонтанно розпадаються з різною швидкістю до стабільнішої атомної конфігурації; чим більша стала розпаду, тим швидше виснажується вихідний радіонуклід з часом.

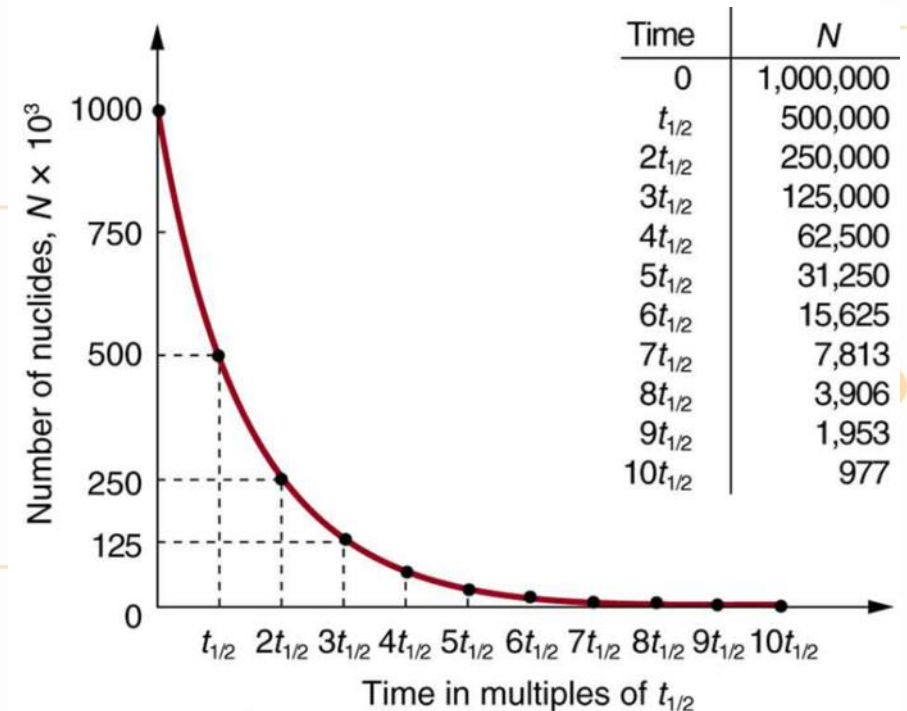
Радіонуклід	Період піврозпаду $T_{1/2}$
Йод-131	8 діб
Карбон-14	5700 років
Кобальт-60	5,3 року
Плутоній-239	24 тис. років
Радій-226	1600 років
Радон-220	56 с
Радон-222	3,8 доби
Уран-235	0,7 млрд років
Уран-238	4,5 млрд років
Цезій-137	30 років

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \approx 0.693\tau$$

Radioactive half-life

Radioactive decay constant

Mean lifetime



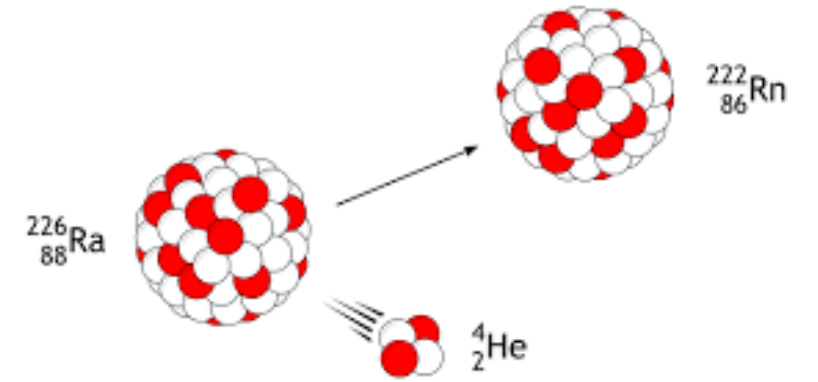
Анрі Беккерель вперше отримав докази природної радіоактивності в 1896 році. Беккерель продемонстрував, що уранова руда затемнює фотопластинку, захищену непрозорим папером, так само, як і рентгенівські промені.

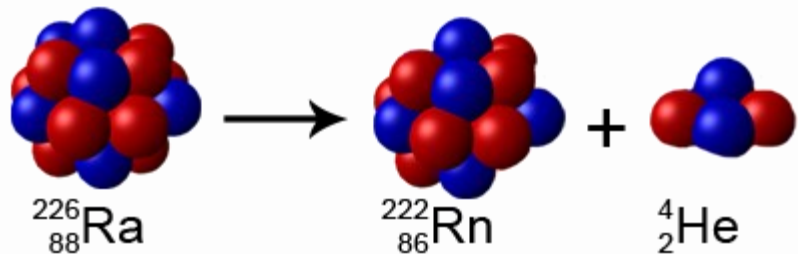
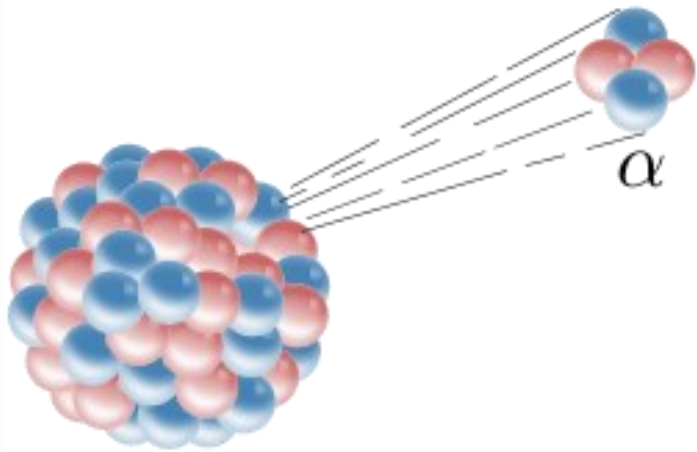
Він припустив, що уран випромінює дуже проникні промені, подібні до рентгенівських. Пізніше це явище було названо **радіоактивністю**.

Коли радіоактивний нуклід розпадається, відбувається **трансмутація**.

Продукт розпаду, або дочірній атом, стає атомом нового елемента з хімічними властивостями, відмінними від початкового материнського атома.

При кожному перетворенні відбувається радіоактивне випромінювання з ядра. Існує кілька способів радіоактивного розпаду, пов'язаних з кожним випромінюванням.

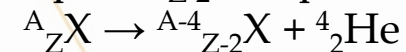




Альфа-частинка (α) - це, по суті, заряджене ядро гелію (He^{2+}), що складається з двох протонів та двох нейтронів, яке випромінюється з ядра атома.

Тільки відносно важкі радіоактивні нукліди, такі як радій, уран, торій і плутоній, розпадаються з альфа-випромінюванням. Наприклад, радій-226 розпадається за допомогою альфа-випромінювання з утворенням радону-222.

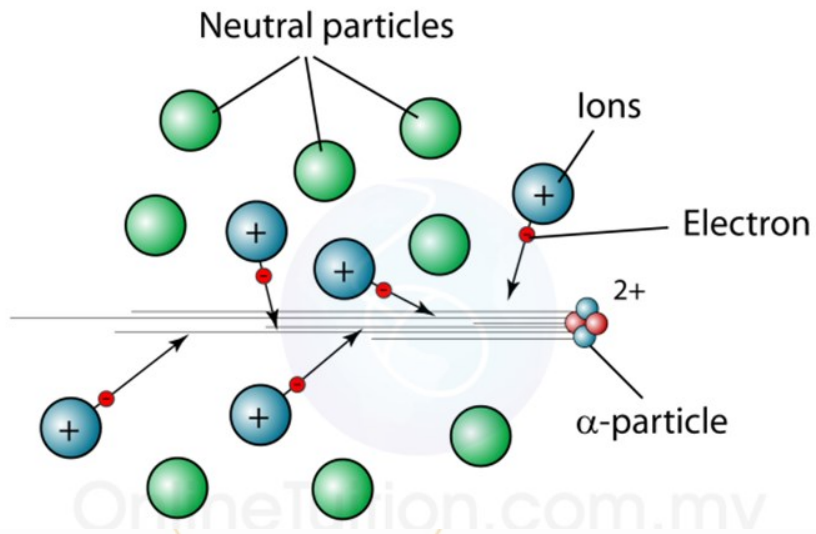
Перетворення ${}^A_Z\text{X}$ ядра в ядро ${}^{A-4}_{Z-2}\text{X}$ виражається наступним чином,



де ${}^A_Z\text{X}$ є **батьківським ядром**, а ${}^{A-4}_{Z-2}\text{X}$ є **дочірнім ядром**.

Альфа-розпад є моноенергетичним, тобто всі альфа-частинки, що випромінюються певним ізотопом, який проходить певне ядерне перетворення, мають однакову енергію.

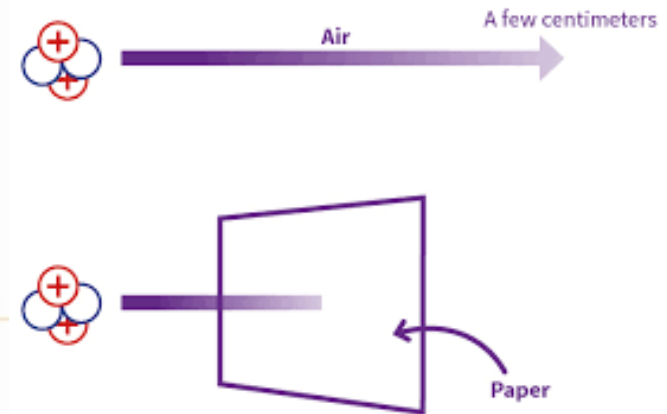


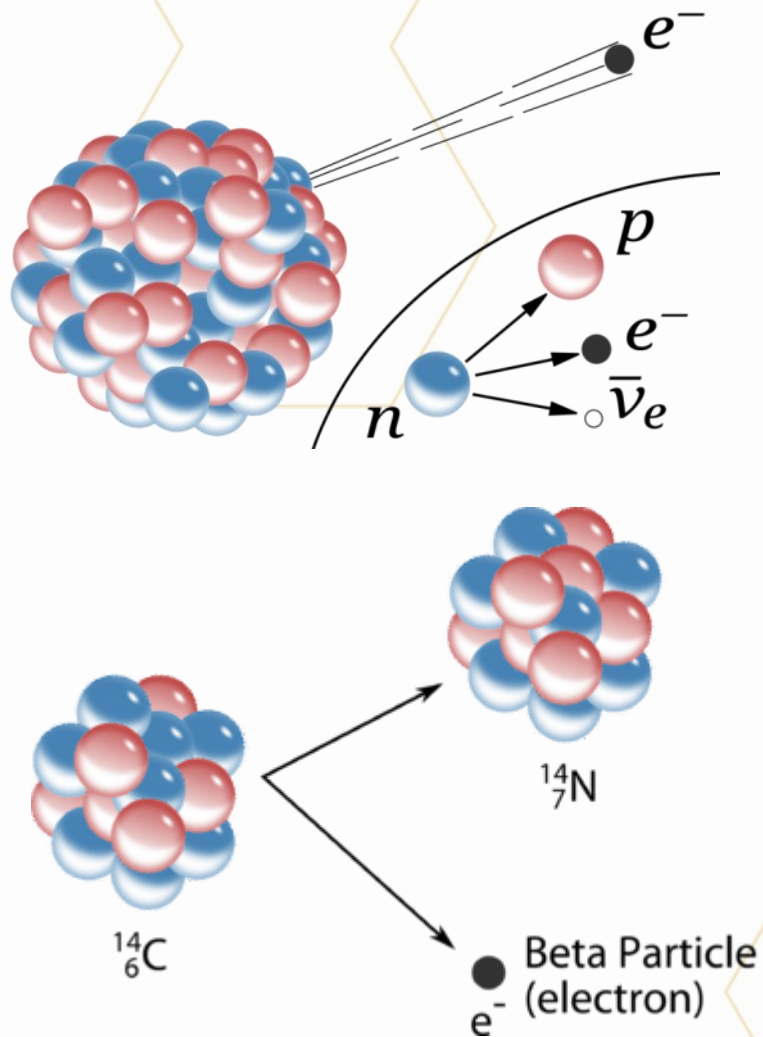


Позитивний заряд альфа-частинки (He^{2+}) рекомбінує з електронами (e^-) з сусідніх атомів, коли вона проходить крізь матеріал, таким чином іонізуючи ці атоми. *Альфа-частинки дуже сильно взаємодіють з будь-яким матеріалом і депонують велику кількість енергії на короткій відстані.*

Одна альфа-частинка спричиняє десятки тисяч іонізацій на сантиметр у повітрі. Такий великий запас енергії обмежує проникну здатність альфа-частинок до дуже короткої відстані. *Ця відстань у повітрі становить близько одного-двох сантиметрів.*

З точки зору радіаційної безпеки, тонкий поглинач, такий як аркуш паперу або омертвілий шар шкіри, легко затримує альфа-частинки. Зовнішнє опромінення тіла такими альфа-джерелами не становить великої небезпеки. Однак всередині тіла альфа-випромінювачі створюють сильні іонізаційні процеси. Оскільки альфа-частинка зазнає багато взаємодій з навколишніми атомами, вона депонує всю свою енергію в дуже маленькому об'ємі (3×10^{-9} см³ в м'язах). *Депонування енергії такої величини в ядрі клітини практично гарантує її руйнування.* З цієї причини необхідно вживати крайніх заходів обережності, щоб запобігти потраплянню джерел альфа-випромінювання в організм шляхом вдихання, прийому всередину з їжею або проколу.





Бета-частинки (β) - це високошвидкісні електрони, що випромінюються з ядра атома. При бета-розпаді нейтрон перетворюється на протон і електрон, а електрон (або бета-частинка) швидко вилітає з ядра, утворюючи новий елемент з атомним номером, збільшеним на 1.

Наприклад, карбон-14 (^{14}C), який має вісім нейтронів і шість протонів, розпадається шляхом бета-розпаду. Після випромінювання бета-частинки ядро містить сім протонів і сім нейтронів. Його масове число залишається незмінним, але атомний номер збільшується на одиницю. Новий елемент з атомним номером 7 - це нітроген.

Найпоширеніші радіонукліди - бета-випромінюючі:
 ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , і ^{35}S .

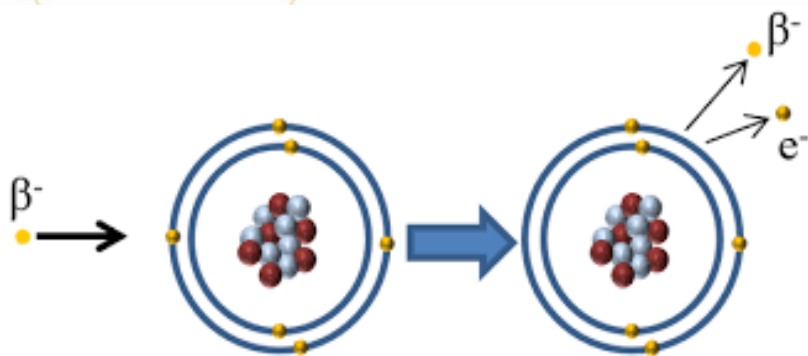
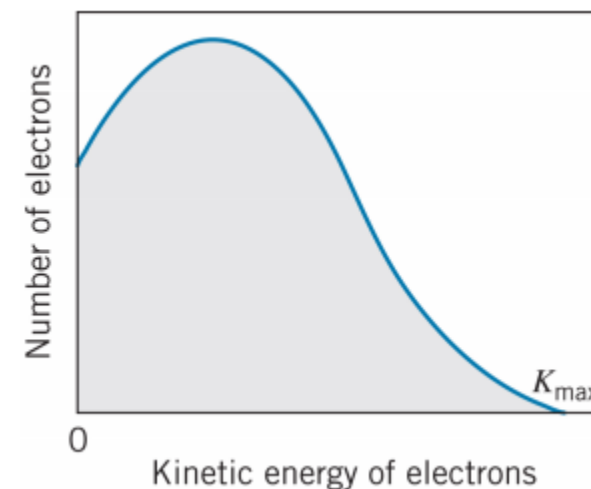


Бета-частинки випромінюються з безперервним спектром кінетичних енергій від нуля до максимального значення енергії розпаду K_{\max} .

Однак більшість бета-частинок вилітають з енергіями, нижчими за цю максимальну енергію.

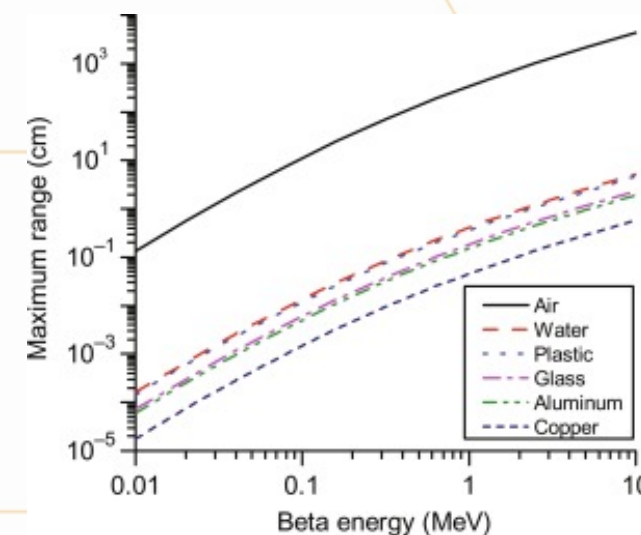
Середня енергія бета-частинок становить близько $1/3 K_{\max}$.

Форма енергетичного спектра бета-частинок для різних радіоізотопів і значень для K_{\max} є характерними для конкретного ізотопу.



Бета-випромінювання викликає іонізацію, зміщуючи електрони з їхніх орбіт. Іонізація відбувається завдяки силі відштовхування між бета-частинкою (β^-) та електроном (e^-), які мають заряд мінус один.

Бета-частинки мають обмежений радіус дії в повітрі та інших матеріалах, який лінійно залежить від їхньої енергії. Радіус дії бета-частинок у повітрі становить близько 3-4 м на MeV. Пластик, скло, алюмінієва фольга або захисні окуляри можуть захистити більшість бета-частинок.



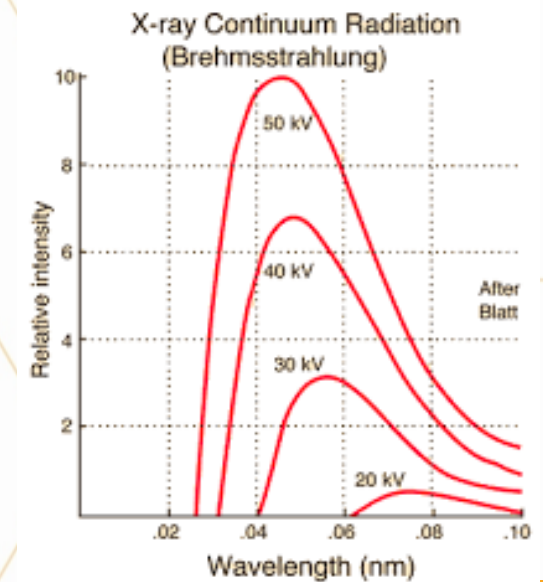
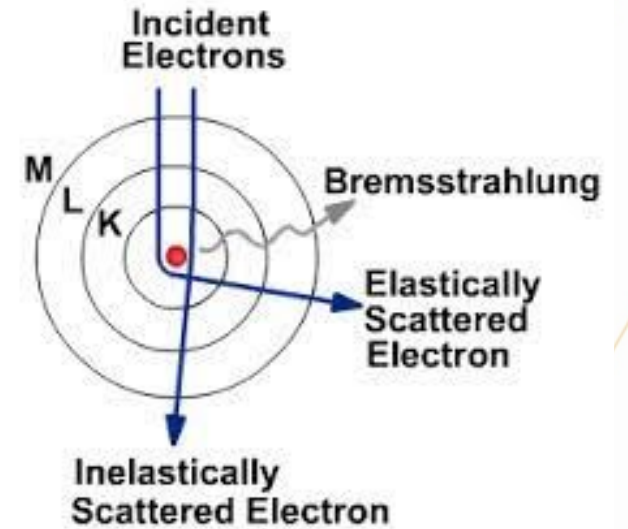
Заряджені частинки, включаючи бета-частинки, втрачають енергію в поглинаючому матеріалі внаслідок збудження, іонізації та випромінювання. Радіаційні втрати енергії заряджених частинок є важливими і називаються **bremsstrahlung**, що в перекладі з німецької означає "гальмівне випромінювання".

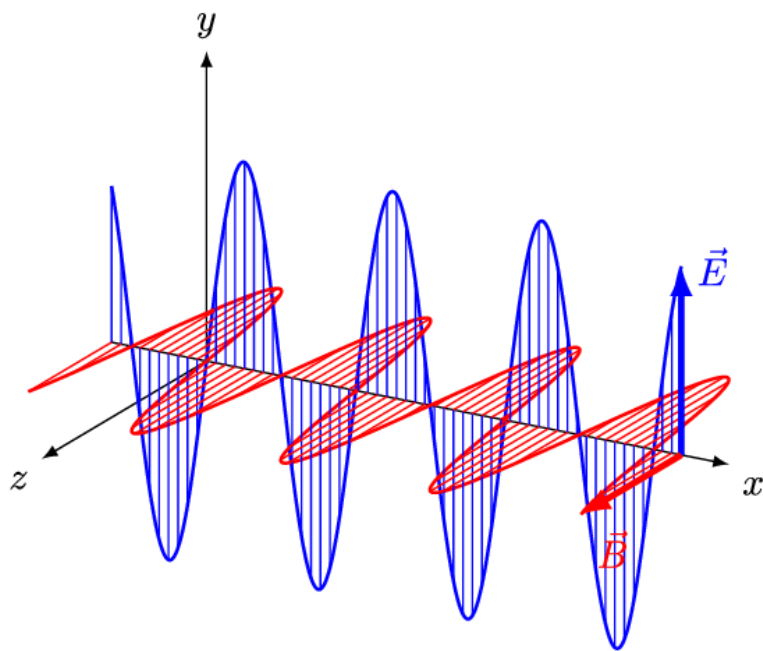
Цей процес відбувається, коли заряджена частинка сповільнюється в поглиначі з супутнім утворенням рентгенівського (або гальмівного) випромінювання.

Це випромінювання є більш проникаючим, ніж вихідне бета-випромінювання.

Частина бета-енергії, яка сприяє утворенню гальмівного випромінювання, прямо пропорційна як атомному номеру поглинача, так і енергії бета-випромінювання.

Щоб запобігти створенню гальмівного випромінювання, високоенергетичні бета-випромінювачі повинні бути екрановані матеріалом з малим атомним номером.



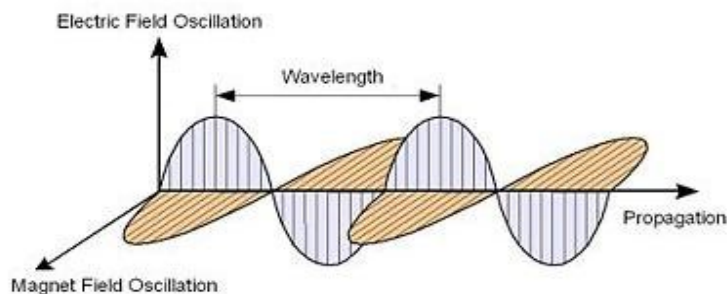
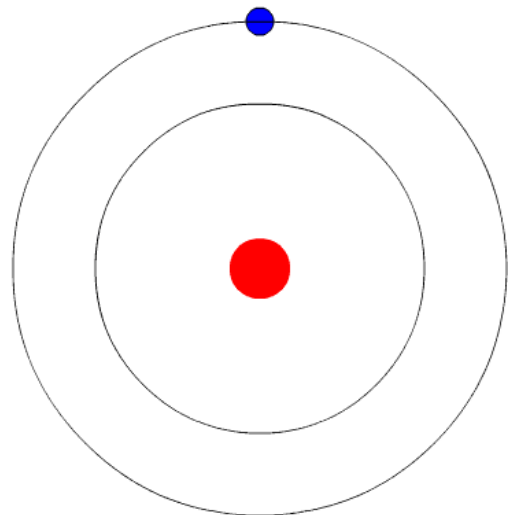


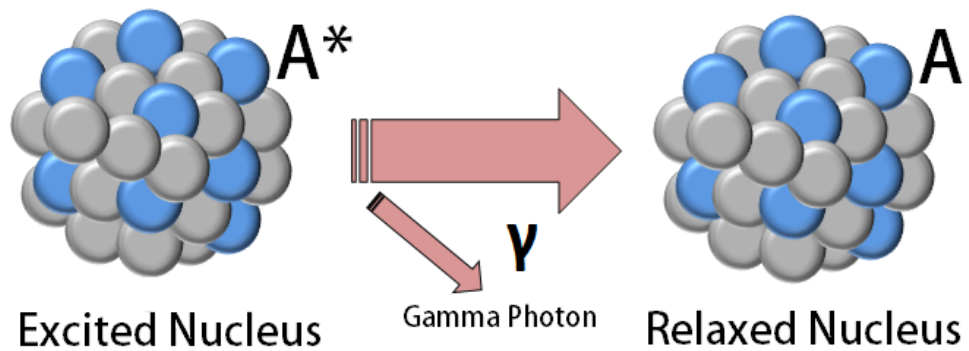
Гамма-промені (γ) і X - промені є електромагнітним випромінюванням і не мають електричного заряду

X-випромінювання виникає в атомах при переході електронів з вищих на нижчі енергетичні рівні. Гамма-промені виникають в результаті перегрупування протонів і нейтронів, що утворюють ядро, і, як і електрони в оболонках атома, можуть змінювати енергію лише дискретно. Ядро, як і електрони в оболонках атома, можуть змінювати свою енергію лише дискретно. І гамма-, і рентгенівське випромінювання випускаються дискретними пакетами енергії, відомими як фотони, і поширюються зі швидкістю світла.

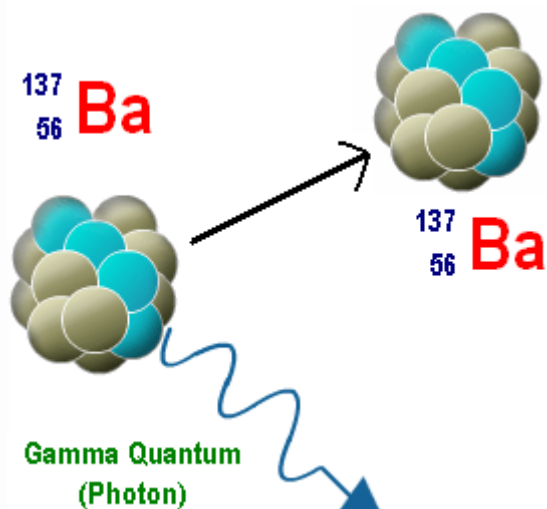
Гамма-промені від радіоактивного розпаду знаходяться в діапазоні енергій від декількох кеВ до ~ 8 МеВ, що відповідає типовим енергетичним рівням в ядрах з досить довгим часом життя.

Гамма-промені зазвичай мають більшу енергію, ніж інші форми електромагнітного випромінювання. Властивості цих фотонів визначаються їхньою довжиною хвилі або частотою.





Гамма-випромінювання може супроводжувати будь-який з інших режимів розпаду. Реакції ядерного розпаду, що призводять до перетворення, як правило, залишають ядро, що утворюється, у збудженому стані. Ядра, що перебувають у цьому збудженому стані, можуть досягти незбудженого або основного стану за допомогою випромінювання гамма-променів.



Якщо ядро випромінює гамма-випромінювання, атомне і масове числа дочірнього ядра залишаються незмінними, але дочірнє ядро утворює інший енергетичний стан того ж елемента.

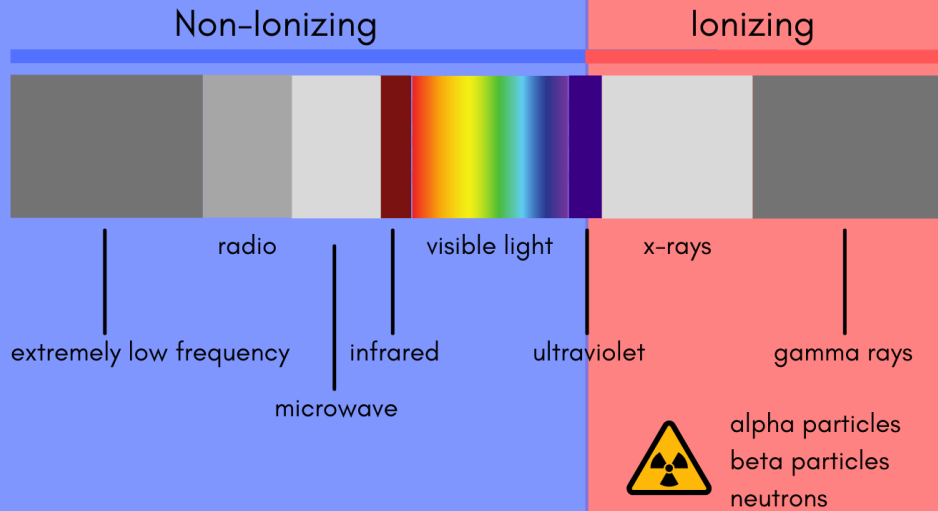
Нукліди з однаковим протонним числом і масовим числом (що робить їх, за визначенням, одним і тим же ізотопом), але в різному енергетичному стані, називаються ядерними ізомерами.

Ізомери зазвичай позначаються надрядковим знаком m : ^{241m}Am чи ^{110m}Ag .

Гамма-розпад зазвичай супроводжує інші форми розпаду, такі як альфа- або бета-розпад. Після бета-розпаду ядра зазвичай містять занадто багато енергії, щоб перебувати в кінцевому стабільному або дочірньому стані.

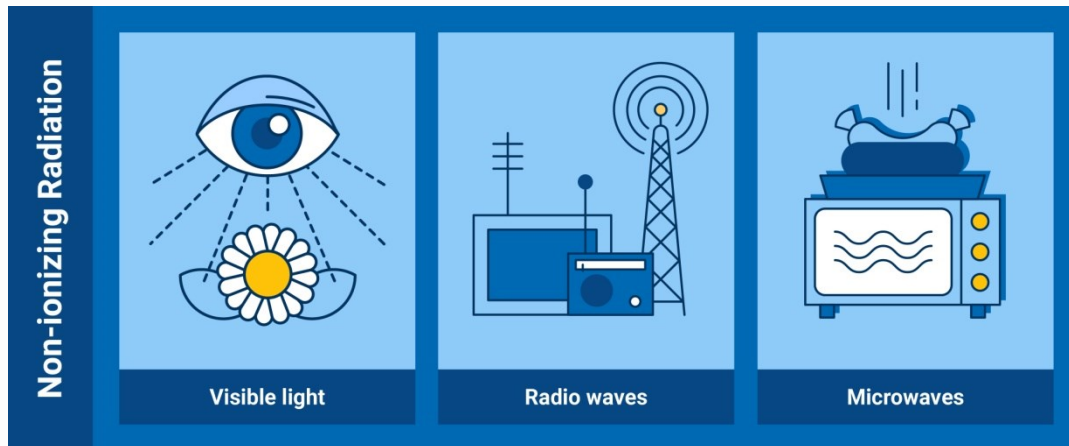
Неіонізуюче випромінювання

Non-Ionizing and Ionizing Radiation

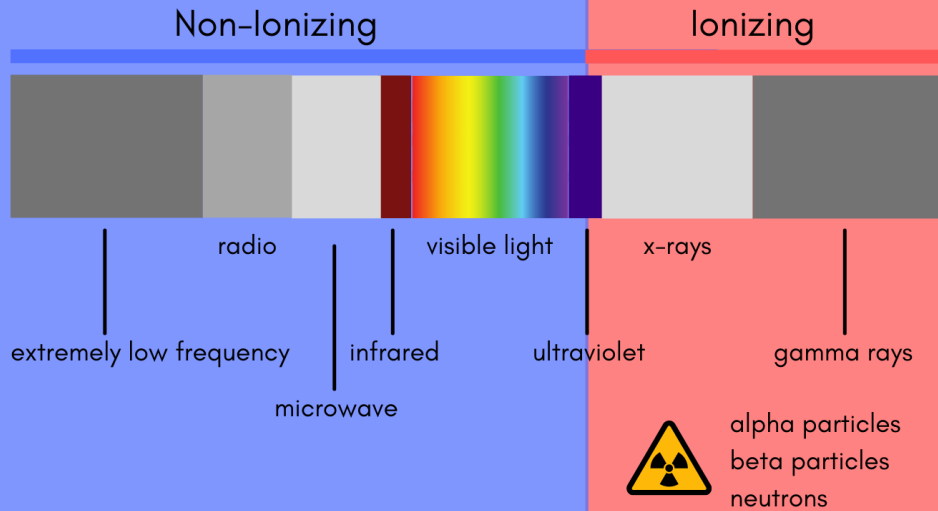


Люди щодня користуються джерелами неіонізуючого випромінювання і піддаються впливу неіонізуючого випромінювання. Ця форма випромінювання не несе достатньо енергії для іонізації атомів чи молекул. Мікрохвильові печі, системи глобального позиціонування, мобільні телефони, телевізійні станції, FM- і AM-радіо, бездротові телефони, відкривачі гаражних дверей і радіоприймачі - всі вони використовують неіонізуюче випромінювання. Інші форми включають магнітне поле Землі та вплив магнітного поля від ліній електропередач, побутової електропроводки та електроприладів.

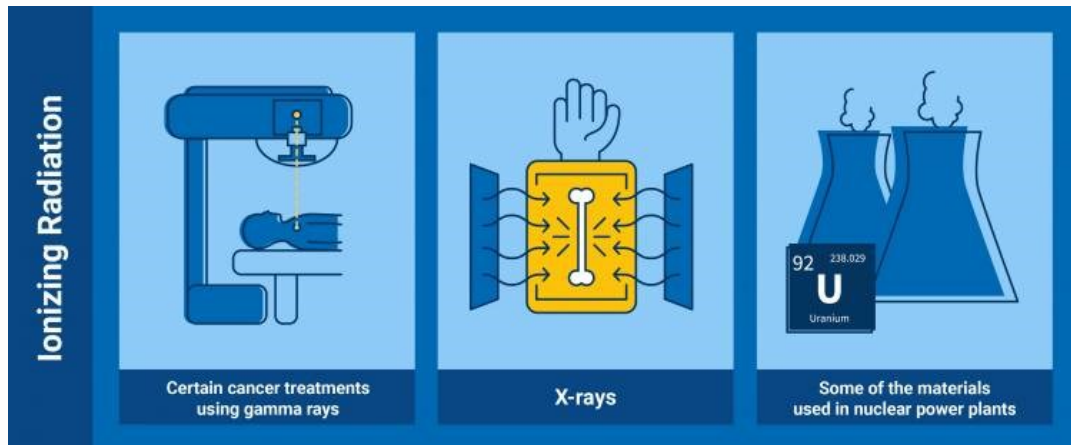
Вони визначаються як хвилі надвисокочастотного випромінювання (НВЧ).



Non-Ionizing and Ionizing Radiation



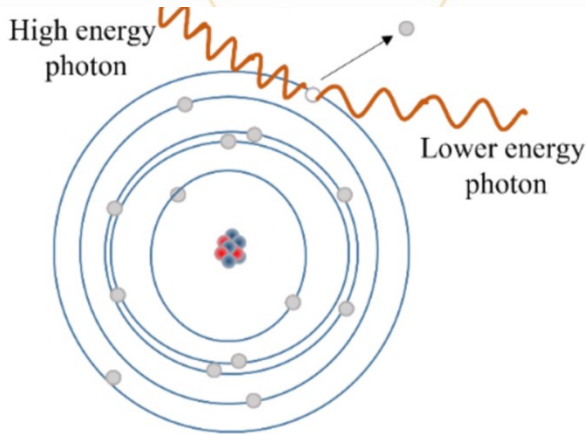
Іонізуюче випромінювання - це вид випромінювання з такою енергією, що здатне відривати електрони від атомів або молекул, що викликає зміни на атомному рівні при взаємодії з речовиною, включаючи живі організми. Такі зміни зазвичай пов'язані з утворенням іонів (електрично заряджених атомів або молекул) - звідси і термін "іонізуюче" випромінювання. У високих дозах іонізуюче випромінювання може пошкодити клітини чи органи нашого тіла або навіть спричинити смерть. При правильному використанні та дозах, а також при дотриманні необхідних заходів захисту, цей вид випромінювання має багато корисних застосувань, наприклад, при виробництві енергії, в промисловості, в наукових дослідженнях, а також у медичній діагностиці та лікуванні різних захворювань, таких як рак.



Випромінювання можна вважати іонізуючим, якщо поглинута енергія достатньо висока, щоб іонізувати пройдений матеріал

Гама-промені / X-промені

Для енергій нижче 50 MeV існує три основні процеси, за допомогою яких фотони взаємодіють з речовиною:

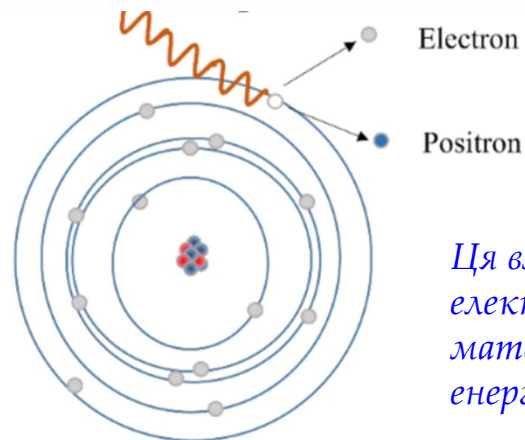


2. Комптонівське розсіювання

Падаючий фотон з енергією $E_{\gamma 1}$ вивільняє орбітальний електрон, утворюючи електрон віддачі з кінетичною енергією E_K і розсіяний фотон з меншою енергією з енергією $E_{\gamma 2}$

$$E_{\gamma 1} = E_K + E_{\gamma 2}$$

У воді або біологічних тканинах цей ефект домінує при енергіях вище 50 keV

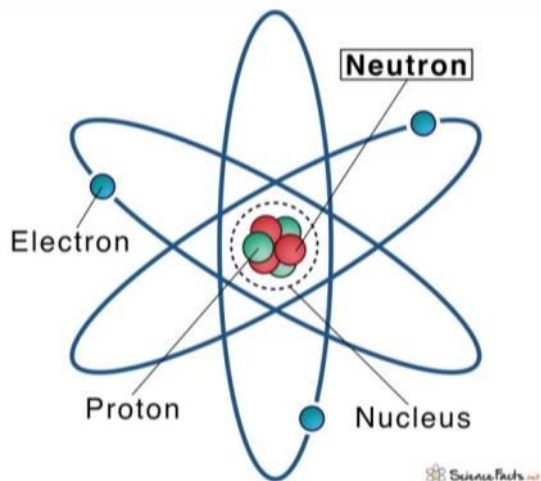


3. Утворення електрон-позитронної пари

Падаючий фотон з енергією $E_{\gamma 1}$ перетворюється на електрон і позитрон.

Ця взаємодія починає відбуватися при енергіях вище 1 MeV. На відміну від електрона, позитрон з часом зникає, анігілюючи один електрон навколишнього матеріалу. Позитронно-електронна пара перетворюється на два фотони з енергією близькою до 0,5 MeV

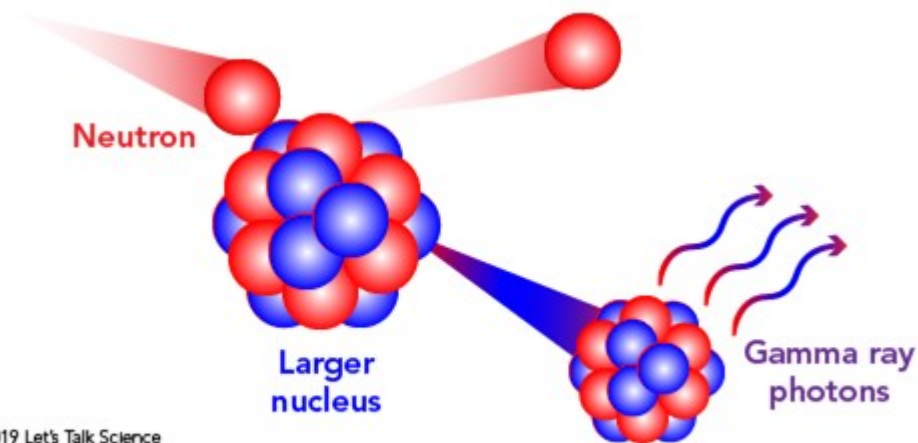
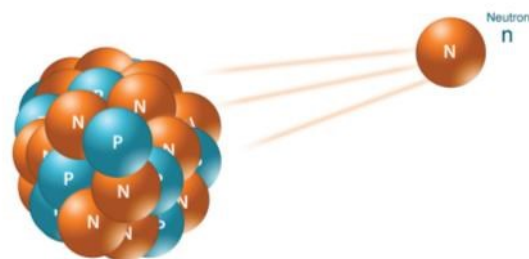


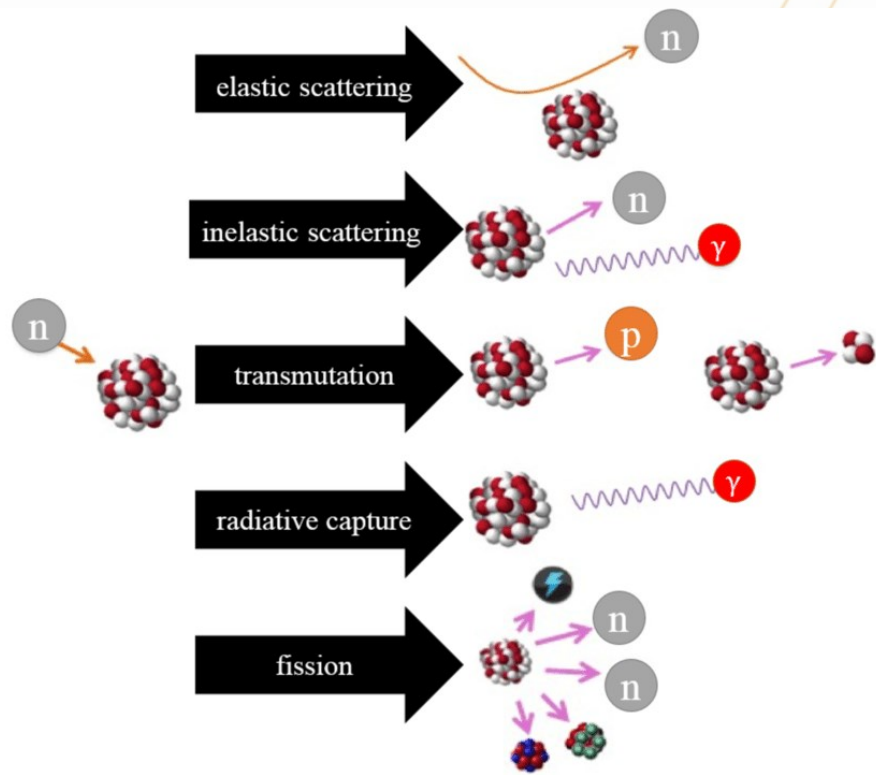


Нейтрон не має електричного заряду, а його маса трохи більша за масу протона і майже у 1839 разів більша за масу електрона.

Нейтрони складають більше половини всієї видимої матерії.

Нейтрони є нейтральними частинками, тому електричні поля електронної хмари і ядра не впливають на політ нейтрона - вони рухаються прямолінійно в речовині, відхиляючись від свого шляху лише внаслідок зіткнення з ядром, яке розсіює у новому напрямку або поглинає (нейтрони зіштовхуються з ядрами, а не з атомами). Однак, нейтронні взаємодії є значною мірою іонізуючими - коли поглинання нейтронів призводить до гама-випромінювання, а гама-промінь (фотон) згодом вириває електрон з атома, або ядро під впливом нейтронної взаємодії, іонізується і викликає подальшу іонізацію в інших атомах.





Типи нейтронно-ядерних реакцій:

- Реакція пружного розсіювання
- Реакція непружного розсіювання
- Поглинання нейтронів
- Радіаційне захоплення
- Ядерний поділ
- Випромінювання нейтронів
- Утворення заряджених частинок

Типи можливих реакцій та їхня ймовірність залежать від кінетичної енергії нейтронів. Нейтрони класифікуються за енергією.

Нижче наведено приблизний перелік: Термічна (0.025 eV) – Повільна (< 10 eV) – Середня (10 eV – 100 keV) – Швидка (>100 keV)

Типова для нейтронів: Нейтрони народжуються швидко. Вони сповільнюються через розсіювання (так зване сповільнення), поки не досягнуть теплової енергії. Нарешті, вони поглинаються ядром-мішенню.

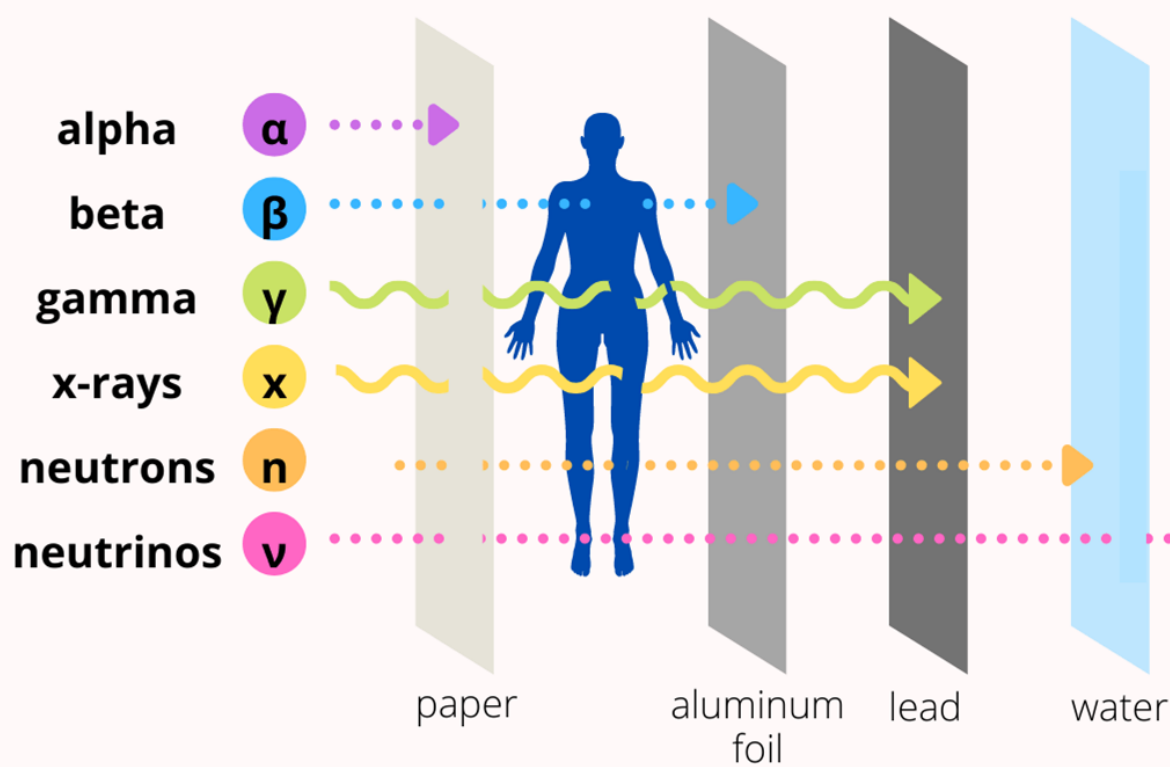
Швидкий нейтрон → Тепловий нейтрон → Захоплення

Пружне розсіювання - це зіткнення типу більярдної кулі, де кінетична енергія зберігається, тобто повна кінетична енергія однакова до і після зіткнення.

Пружне розсіювання є найбільш ймовірною взаємодією майже для всіх нуклідів і енергій нейтронів. Найбільша кількість енергії може бути передана від нейтрона до ядра-мішені, коли останнє має таку ж масу, як і нейтрон. Таким чином, чим меншим є атомне масове число мішені, тим ефективнішою вона є як сповільнювач. Сповільнювачі (наприклад, вода, парафін, пластик і графіт) уповільнюють нейтрони шляхом пружного розсіювання.

Решта енергії передається ядру-мішені як енергія збудження і спричиняють випромінювання вторинних заряджених частинок (таких як протони, альфа-частинки або ядерні фрагменти, важчі за вуглець, кисень, азот або водень), які відповідають за іонізацію тканин та біологічну дію.





Альфа-частинки взаємодіють з речовиною переважно через кулонівські сили між їхнім позитивним зарядом і негативним зарядом атомних електронів у поглиначі. Товщини аркуша паперу достатньо, щоб зупинити всі альфа-частинки

Бета-частинки також взаємодіють через кулонівські сили з атомними електронами. Бета-частинки мають набагато більшу швидкість завдяки меншій масі, і в зіткненнях беруть участь менші імпульси.

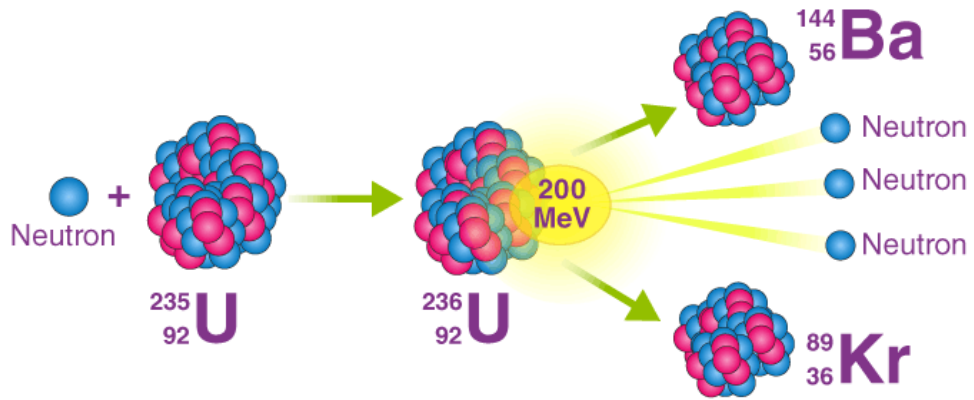
Таким чином, бета-частинки проникають у речовину значно глибше, ніж альфа-частинки, але через природу кулонівських взаємодій бета-частинки також зупиняються невеликою кількістю речовини (порівняно з гамма-частинками).

Гамма-промені є найбільш проникаючим типом випромінювання від радіоактивного розпаду. Свинцевий екран зменшує інтенсивність гамма-випромінювання.

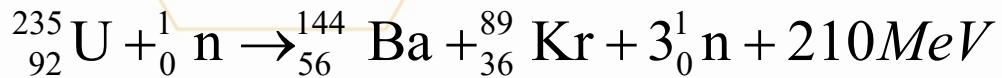
Нейтрони можуть проникати крізь людське тіло і свинцевий захист, але товстий шар води або бетону поглинає їх.

Загалом, нейтрино є найбільш проникаючою формою випромінювання. **Нейтрино** - це енергетичні, майже безмасові частинки, які майже неможливо зупинити. Нейтрино проходять крізь Землю, зірки та цілі галактики, дуже рідко взаємодіючи з будь-якою матерією.





Коли атом урану-235 бомбардують нейтронами, він розщеплюється на два легших ядра - барій і криптон.



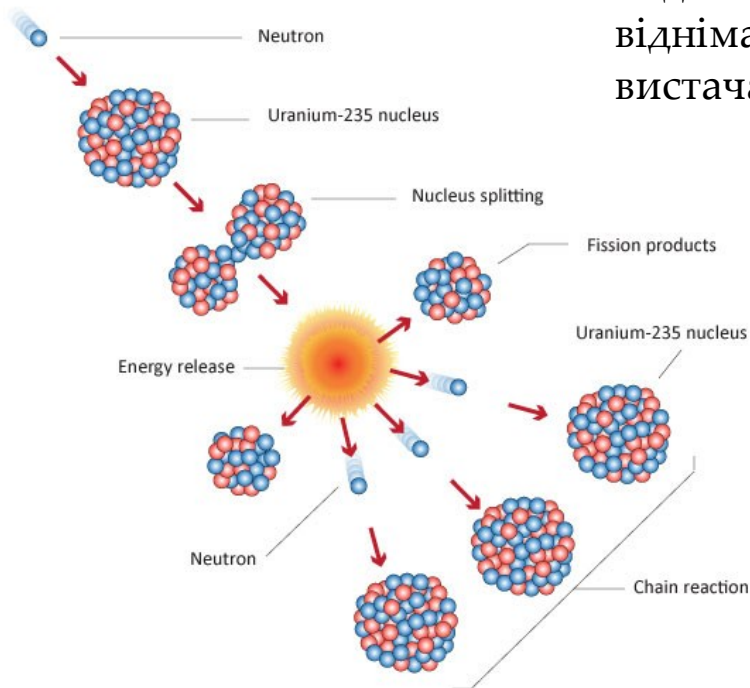
Під час **ядерного поділу** частина маси ядра перетворюється на енергію. Ця маса віднімається від загальної маси вихідних частинок, а в утвореному ядрі цієї маси не вистачає. :

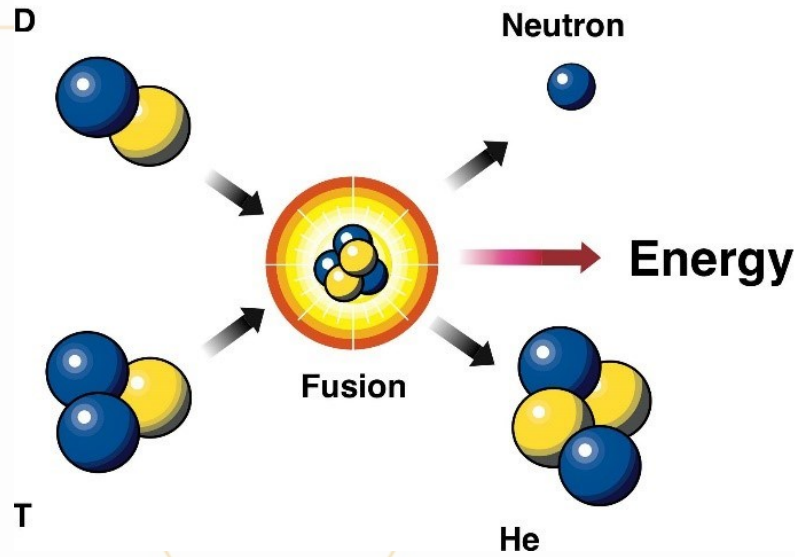
$$E = \Delta mc^2$$

Ланцюгова реакція: нейтрони, що вивільняються при поділі, можуть продовжувати ділитися в інших ядрах урану-235. Ці ядра урану розщеплюються, утворюючи нові нейтрони, які, в свою чергу, запускають поділ у наступних ядрах урану-235 і так далі.

Ланцюгові реакції використовуються в ядерних реакторах та атомних бомбах.

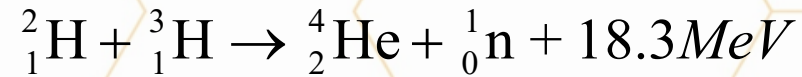
В атомній бомбі уран використовується вище критичного розміру, щоб отримати неконтрольовану ланцюгову реакцію, гарантуючи, що весь наявний матеріал зазнає поділу за мінімально можливий час. У ядерних реакторах концентрація урану-235 набагато менша, і ланцюгова реакція контролюється для того, щоб зменшити її і, що важливіше, зупинити, якщо це необхідно.





Ядерний синтез - це процес, в якому ядра легких елементів об'єднуються або зливаються разом, утворюючи важчі ядра. Прикладом реакції синтезу є реакція синтезу дейтерію (${}^2_1\text{H}$, D) і тритію (${}^3_1\text{H}$, T) ядра зливаються разом, утворюючи ядро гелію.

Дейтерій і тритій - ізотопи водню. Реакція відбувається наступним чином:



Ця реакція вивільняє величезну кількість енергії

Термоядерний синтез вимагає надзвичайно високих температур і тиску для подолання електростатичного відштовхування між позитивно зарядженими атомними ядрами.

Потенційні переваги ядерного синтезу

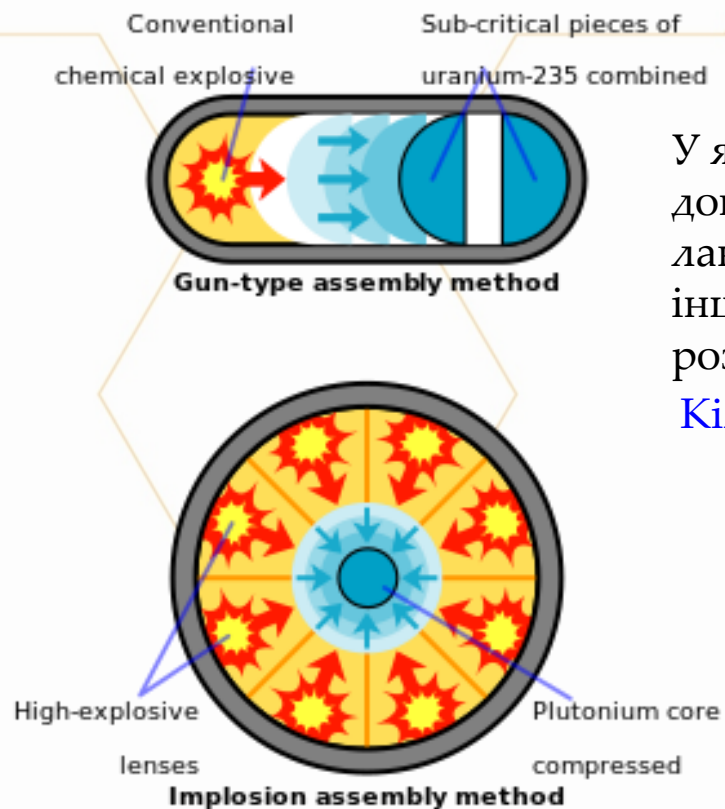
Велика кількість палива: Дейтерій можна добувати з морської води, а тритій - з літію, що робить термоядерне паливо доступним у всьому світі.

Низький вплив на навколишнє середовище: Реакції термоядерного синтезу не утворюють парникових газів або довгоживучих радіоактивних відходів, що робить його чистим і сталим джерелом енергії.

Висока густина енергії: Термоядерний синтез має набагато вищу густину енергії порівняно з викопним паливом або ядерним поділом, а це означає, що невелика кількість термоядерного палива може генерувати велику кількість енергії.

Безпека: Реакції термоядерного синтезу за своєю суттю безпечні, оскільки будь-яке порушення умов у плазмі призведе до зупинки реакції, усуваючи ризик протікання реакції або розплавлення.





У ядерній зброї маса матеріалу, що розщеплюється (збагаченого урану або плутонію), доводиться до надкритичного стану - це дозволяє експоненціальне зростання ядерних ланцюгових реакцій - або шляхом влучання одного шматка підкритичного матеріалу в інший (1), або шляхом стиснення підкритичної сфери або циліндра з матеріалом, що розщеплюється, за допомогою вибухових лінз з хімічним паливом (2).

Кількість енергії, що виділяється при розщепленні, може варіюватися від еквіваленту трохи менше тонни до 500 000 тонн (500 кілотонн) тротилу (4.2 to 2.1×10^6 GJ)

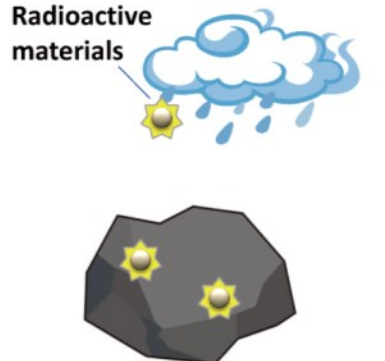
Усі реакції поділу утворюють продукти поділу - залишки атомних ядер, що розділилися. Багато продуктів поділу є або високорадіоактивними (але короткоживучими), або помірно радіоактивними (але довгоживучими), і, як такі, вони є формою **радіоактивного забруднення**. Продукти поділу є основним радіоактивним компонентом ядерних опадів. Іншим джерелом радіоактивності є сплеск вільних нейтронів, вироблених зброєю.

Ядерні радіоактивні опади - це залишкові радіоактивні матеріали, що викидаються у верхні шари атмосфери після ядерного вибуху, тому що вони "випадають" з неба після вибуху і проходження ударної хвилі. Кількість і поширення радіоактивних опадів залежить від розміру боєприпасу і висоти, на якій він вибухнув. Радіоактивні опади можуть бути захоплені продуктами пірокумулятивними хмарами і випасти у вигляді чорного дощу. **Радіоактивний пил**, що складається з продуктів поділу, змішаних зі збереженими атомами, які активуються нейтронами під впливом опромінення є однією з форм радіоактивного забруднення.

Becquerel (Bq)
Unit indicating the amount of radioactivity

One nucleus decays per second =
1 becquerel (Bq)

Radioactive materials



Міра радіоактивності (**активності**) базується на підрахунку розпадів за секунду. Одиницею активності в СІ є **бекерель** (Бк), що дорівнює оберненій секунді.

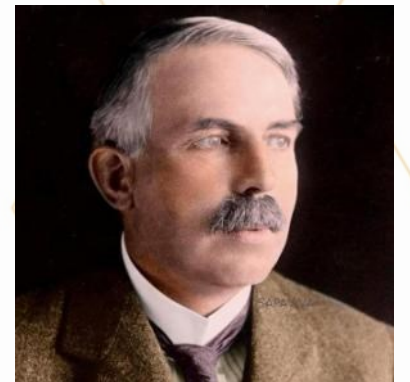
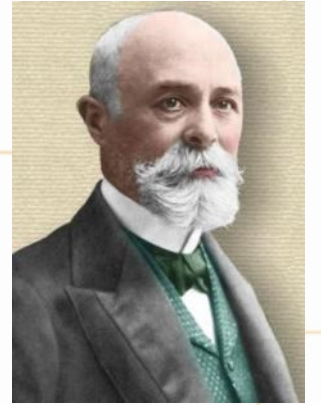
Активність залежить лише від кількості розпадів за секунду, а не від типу розпаду, енергії продуктів розпаду чи біологічної дії випромінювання.

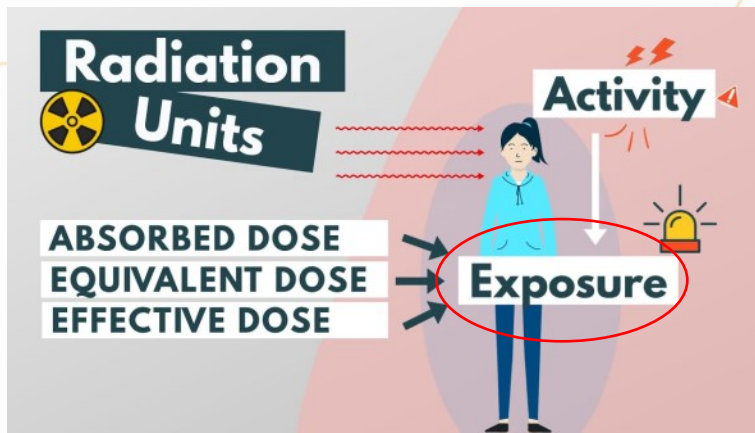
Її можна використовувати для характеристики швидкості випромінювання іонізуючого випромінювання. Питома активність визначається як активність на кількість атомів певного радіонукліду. Питома активність зазвичай подається в одиницях Бк/г.

Позасистемні одиниці вимірювання

Кюрі (Ки) це позасистемна одиниця радіоактивності;
 $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ розпадів на секунду

Резерфорд (Рд) також не є одиницею СІ і визначається як активність кількості радіоактивного матеріалу, в якому розпадається один мільйон ядер за секунду.
 $1\text{Rd} = 1 \times 10^6$ розпадів на секунду



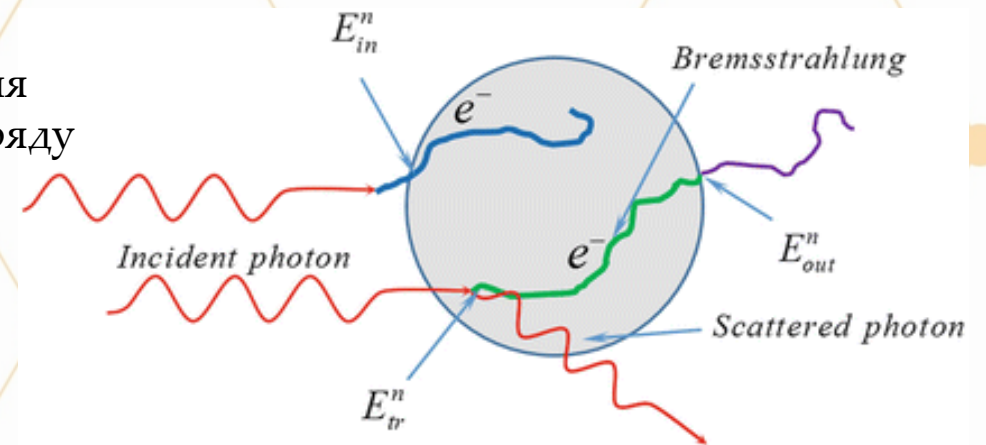


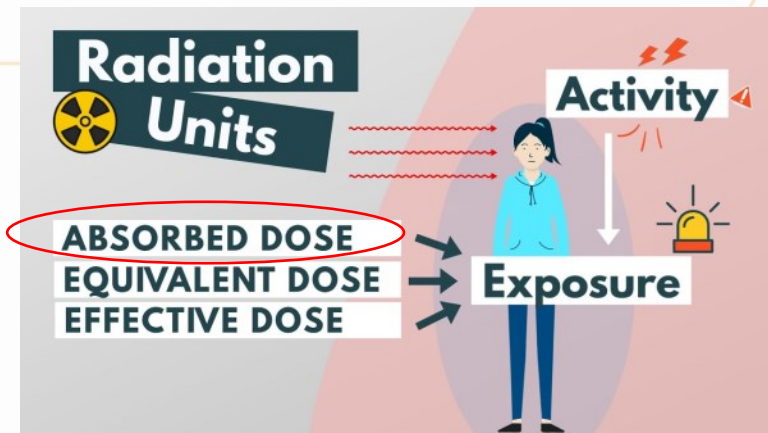
Радіаційне опромінення визначається як сума електричних зарядів (Δq) на всіх іонах одного знаку, що виникають у повітрі при повній зупинці в ньому всіх електронів, які випромінені фотонами в об'ємі повітря, масою Δm . Радіаційне опромінення позначається символом X . Одиницею радіаційного впливу в СІ є кулон на кілограм (Кл/кг), на практиці використовується рентген.

Рентген (Р), одиниця радіаційного впливу. 1 Р означає кількість рентгенівського або γ -випромінювання, яка необхідна для вивільнення позитивних і негативних зарядів однієї електростатичної одиниці заряду (Кл) в 1 см^3 сухого повітря при нормальній температурі і тиску.

Один рентген (1 Р) відповідає 2.58×10^{-4} кулонів на кілограм іонів, що утворюються в повітрі, а експозиція в один кулон на кілограм еквівалентна 3876 рентгенам.

Керма - це міра кінетичної енергії, що передається від випромінювання до речовини, і є аббревіатурою від "кінетична енергія, що виділяється на одиницю маси". Керма позначається символом K , вимірюється в одиниці СІ - сірому.





Величини та одиниці радіації. Поглинута доза

Доза визначається як кількість енергії, поглинутої іонізуючим випромінюванням у речовині. Поглинута доза залежить від типу речовини, яка поглинає випромінювання. *Поглинута доза позначається символом D .*

Існує три ключові механізми взаємодії гамма-променів з речовиною.

Одиниці поглиненої дози:

1 Грей (Гр) еквівалентний одиниці енергії (джоуль), поглиненої в кілограмі речовини (одиниця системи СІ).

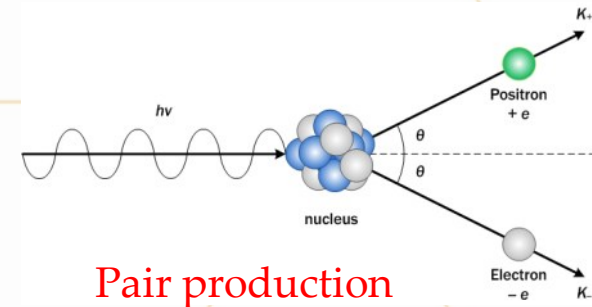
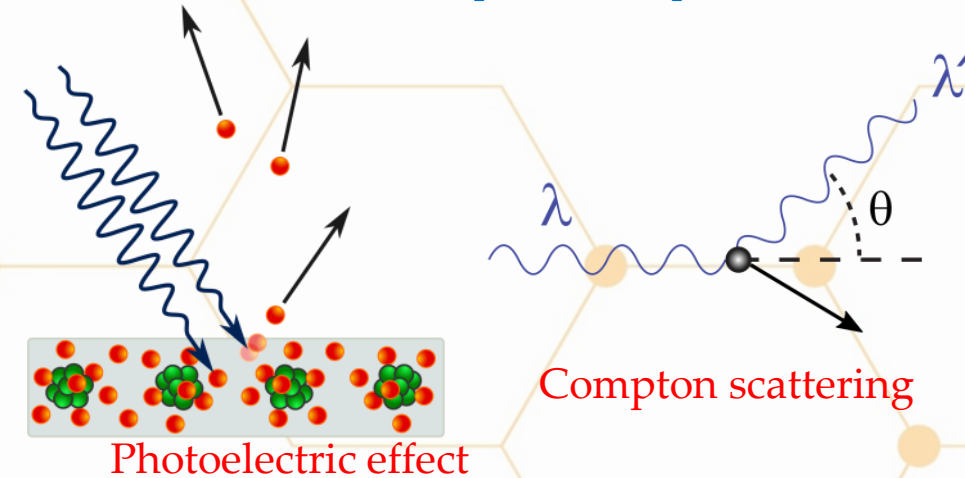
Один грей - це велика кількість поглинутої дози. Людина, яка поглинула дозу опромінення всього тіла в 1 Гр, поглинула один джоуль енергії в кожному кілограмі тканини тіла.

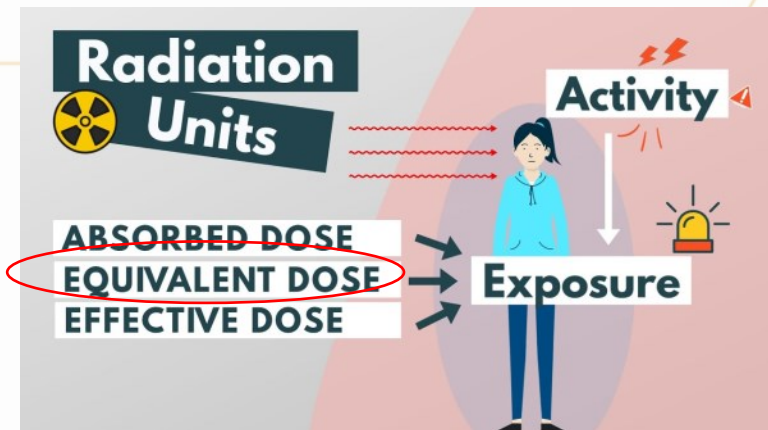
1 Рад еквівалентний депонуванню ста ергів енергії в одному грамі будь-якого матеріалу (це одиниця енергії, а 1 ерг відповідає 10^{-7} Дж). 1 рад - це значно менша доза, ніж один грей. Людина, яка поглинула дозу опромінення всього тіла в 100 рад, поглинула один джоуль енергії в кожному кілограмі тканини тіла (тобто 1 Гр).

Перерахунок з одиниць СІ в інші одиниці здійснюється наступним чином:

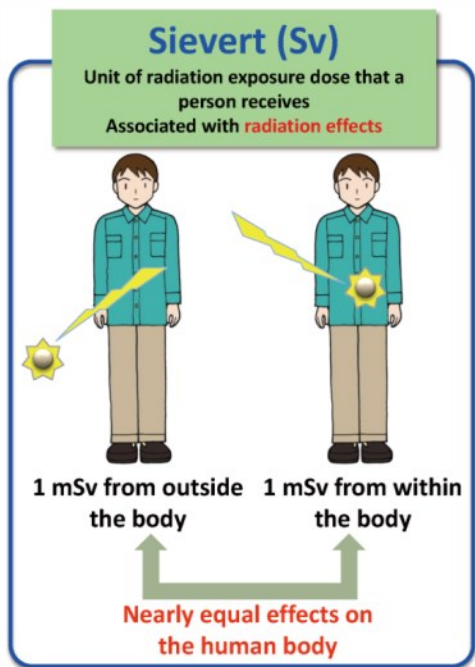
$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ Рад}$$

$$1 \text{ мГр} = 100 \text{ мРад}$$





Еквівалентна доза (символ ЕД) — це величина дози, розрахована для окремих органів. Еквівалентна доза базується на поглиненій дозі органу, скоригованій з урахуванням ефективності типу випромінювання. Еквівалентна доза позначається символом НТ.



Одиницею СИ ЕД є зіверт (Зв). **1 Зіверт** представляє еквівалентний біологічний ефект утворений 1 джоулем енергії гамма-променів на 1 кілограм тканини людини.

1 зіверт — це велика кількість еквівалентної дози. Людина, яка поглинула дозу всього тіла в 1 Зв, поглинула один джоуль енергії в кожному кг тканини тіла (у випадку гамма-променів).

Використовується також **1 рем** (рентгенівський еквівалент людини).

Перерахунок з одиниць СИ в інші одиниці здійснюється наступним чином:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ Рем}$$

Ефективна колективна доза визначається як сума всіх індивідуальних ефективних доз в групі людей за період часу від іонізуючого випромінювання. Ефективну колективну дозу позначають символом S. Одиницею ефективною колективною дози є джоуль на кілограм ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$) або людино-зіверт (люд.Зв). Колективну дозу можна отримати добутком середньої індивідуальної дози на кількість людей у групі.

$$S = \sum_i E_i N_i$$

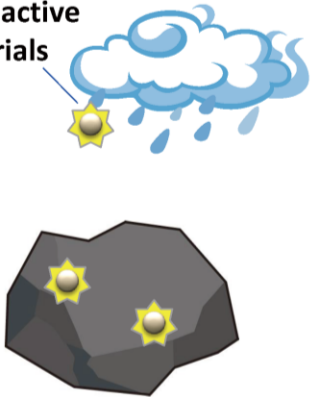
- E_i is the average effective dose for a subgroup i.
- N_i is the number of individuals in the subgroup i.

Becquerel (Bq)

Unit indicating the amount of radioactivity

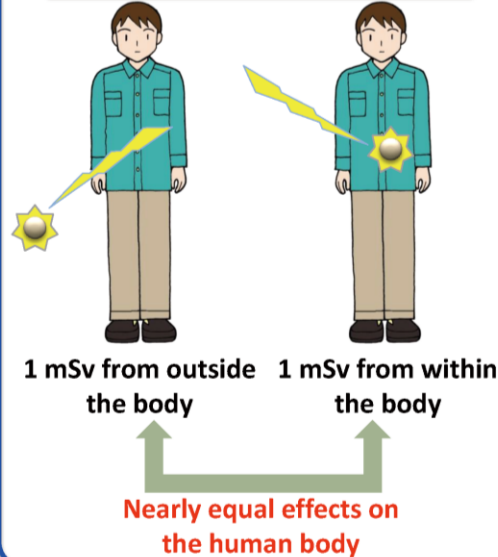
One nucleus decays per second =
1 becquerel (Bq)

Radioactive
materials



Sievert (Sv)

Unit of radiation exposure dose that a
person receives
Associated with radiation effects



"**Беккерель**" і "**зіверт**" - найпоширеніші одиниці радіоактивного випромінювання.

Беккерель - це одиниця радіоактивності, яка фокусується на тому, звідки надходить радіація. Вона використовується для вираження кількості радіоактивних матеріалів, що містяться в ґрунті, продуктах харчування, водопровідній воді тощо. Чим вище значення, виражене в беккерелях, тим більша радіація випромінюється.

Зіверт - це одиниця дози опромінення, яку отримує людина і використовується по відношенню до того, що піддається опроміненню, тобто до людського тіла. Чим більше значення, виражене в зівертах, тим більший вплив радіації на організм людини

Sievert is expressed by the symbol "Sv."

- 1 millisievert (mSv)
= one thousandth of 1 Sv
- 1 microsievert (μ Sv)
= one thousandth of 1 mSv

Грей - одиниця поглиненої дози - визначається як поглинання одного джоуля енергії випромінювання на кілограм речовини

Source of radiation

Radiation intensity*¹

Becquerel (Bq)



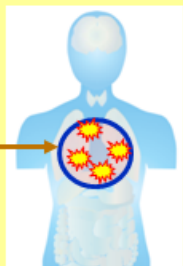
Radioactive materials

*1: Number of nuclei that decay per second

Receiving side

Absorbed dose*²
Gray (Gy)

Amount of energy absorbed by a substance of unit mass that received radiation



$$\text{Gy} = \frac{\text{Absorbed energy (J)}}{\text{Mass of the part receiving radiation (kg)}}$$

*2: Energy absorbed per 1 kg of substances (Joule: J; 1J ≅ 0.24 calories); SI unit is J/kg.

Differences in effects depending on types of radiation

Equivalent dose (Sv)

Differences in sensitivity among organs

Effective dose
Sievert (Sv)

Unit for expressing radiation doses in terms of effects on the human body

Одиниці випромінювання можна умовно розділити на одиниці для джерел випромінювання та одиниці для приймаючої сторони.

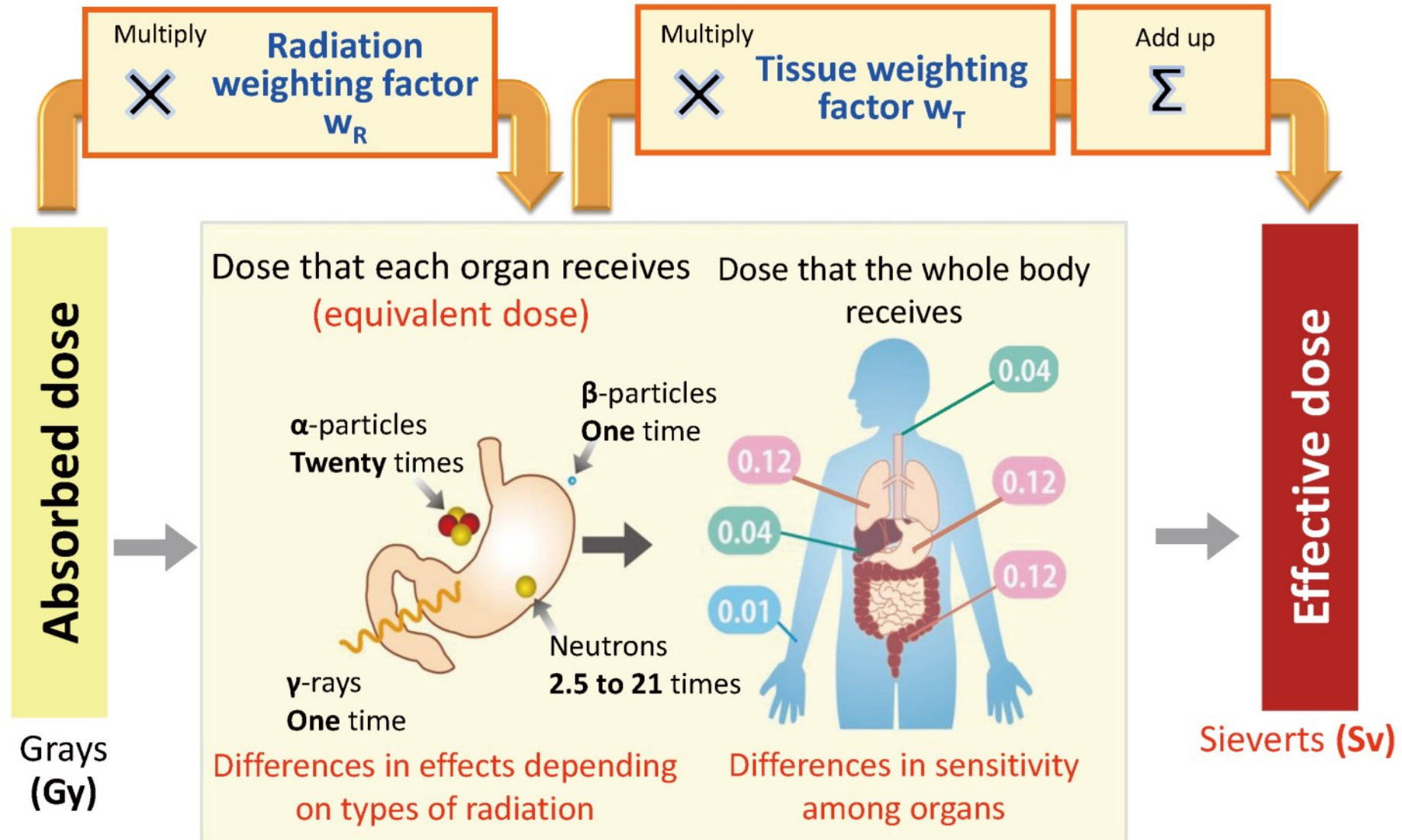
Беккерель, одиниця радіоактивності, використовується для джерел випромінювання. Одиницями для приймаючої сторони є **грей** і **зіверт**.

Коли випромінювання проходить через речовину, його енергія нею поглинається.

Грей - це одиниця для позначення поглиненої дози. Ступінь впливу на організм людини змінюється в залежності від типу та кількості енергії випромінювання, навіть якщо поглинута доза однакова.

Дози, що зважають вплив на здоров'я відповідних видів випромінювання, називаються **еквівалентними дозами** (виражаються в зівертах). **Ефективна доза** (виражена в зівертах) була розроблена для управління опроміненням в радіологічному захисті. На відміну від еквівалентної дози, ефективна доза зважає відмінності в чутливості органів і тканин та підсумовує їх, щоб виразити вплив радіації на весь організм.







International Commission
on Radiological Protection

Equivalent dose (Sv) = Radiation weighting factor w_R × Absorbed dose (Gy)

Type of radiation	Tissue weighting factor w_R
γ -rays, X-rays, β -particles	1
Proton beams	2
α -particles, heavy ions	20
Neutron beams	2.5~21

Effective dose (Sv) = Σ (Tissue weighting factor w_T × Equivalent dose)

Tissue	Tissue weighting factor w_T
Red bone marrow, colon, lungs, stomach, breasts	0.12
Gonad	0.08
Bladder, esophagus, liver, thyroid	0.04
Bone surface, brain, salivary gland, skin	0.01
Total of the remaining tissues	0.12

Sv: sieverts; Gy: grays

Source: 2007 Recommendations of the ICRP

Рекомендації, видані Міжнародною комісією з радіологічного захисту (МКРЗ), встановлюють вагові коефіцієнти та коефіцієнти для різних тканин.

α -частинки мають у 20 разів більший вплив на організм людини, ніж γ -промені та β -частинки з однаковими поглиненими дозами.

Нейтронні пучки також мають високі радіаційні вагові коефіцієнти і, як очікується, мають у 2,5-21 разів більший вплив на організм людини, ніж γ -промені та β -частинки, залежно від енергетичних величин.





Величини та одиниці радіації. Еквівалентна доза.

Стохастичні ефекти іонізуючого випромінювання виникають випадково, як правило, безпорогового рівня дози. Ймовірність виникнення стохастичних ефектів пропорційна дозі, але тяжкість ефекту не залежить від отриманої дози. Біологічний вплив радіації на людину можна поділити на соматичні та спадкові ефекти. Соматичні ефекти - це ті, яких зазнає опромінена людина, а спадкові ефекти - це ті, яких зазнають нащадки опроміненої людини. Ризик виникнення раку зазвичай згадується як основний стохастичний ефект іонізуючого випромінювання, але спадкові захворювання також є стохастичними ефектами.

Ефективна доза може бути виражена як:

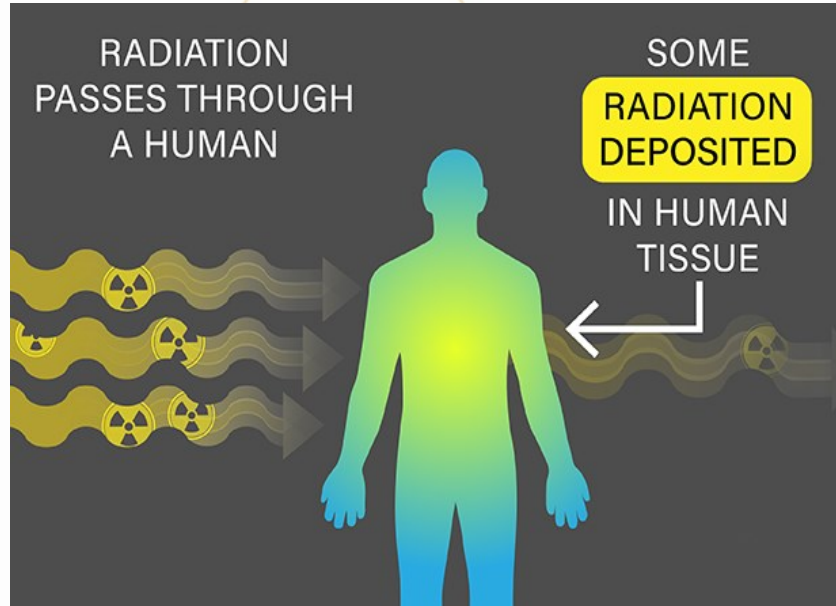
$$E = \sum_T w_T H_T$$

H_T - еквівалентна доза, усереднена по тканині або органу T від падаючого випромінювання
 w_T - ваговий коефіцієнт тканини

Ефективна доза дорівнює подвоєній сумі поглинутих доз в усіх органах і тканинах тіла. При цьому важливо, чи опромінюється людина частково або повністю, а також важливо, чи піддається людина впливу гамма-випромінювання або іншого виду радіації. Ефективна доза дозволяє визначити стохастичні біологічні наслідки всіх видів випромінювання. Ліміти доз встановлюються в термінах ефективної дози і застосовуються до людини з метою радіологічного захисту, включаючи оцінку ризику в загальних рисах.



Radiation is all around us

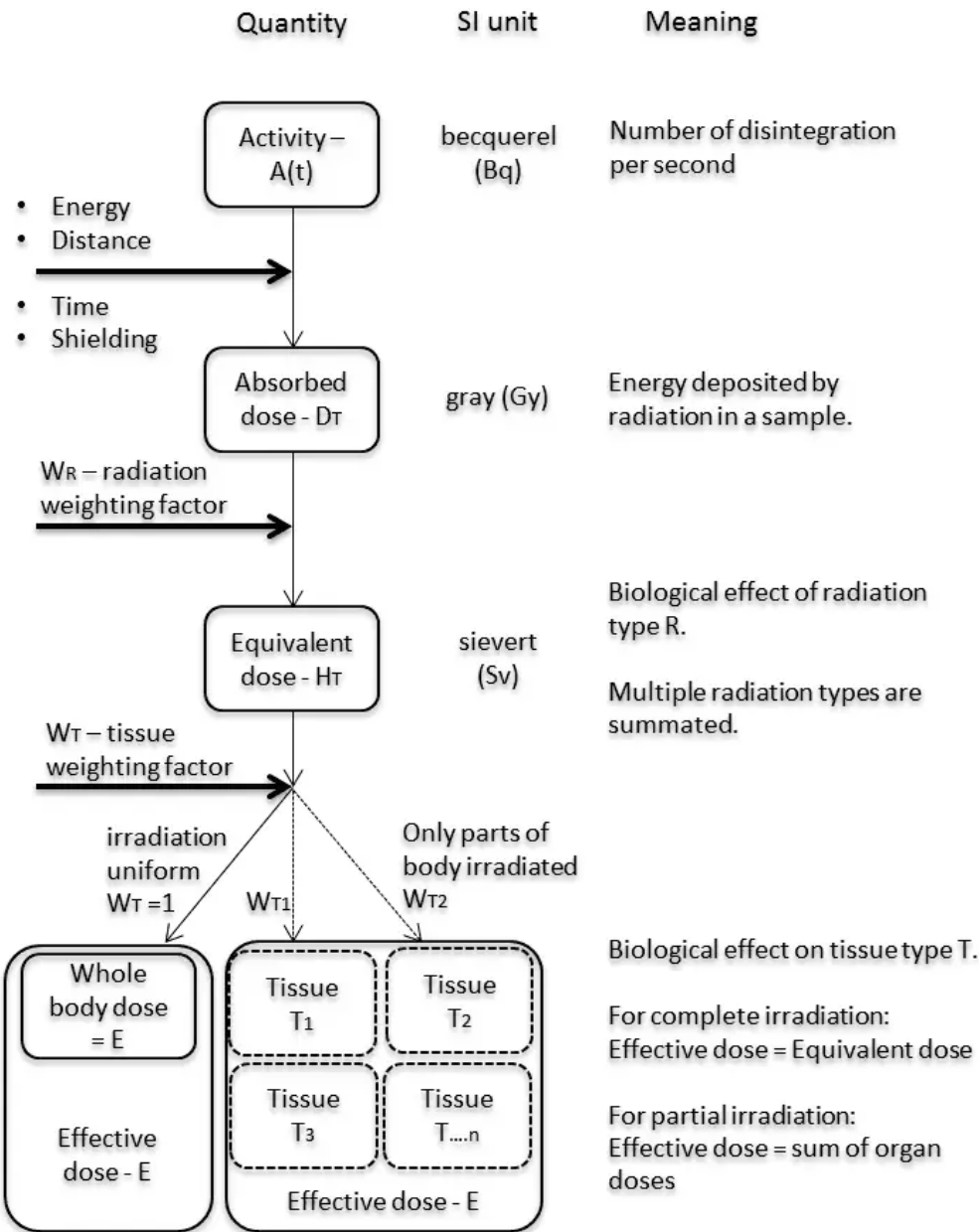


- 0,05 мкГр - спати поруч з кимось
- 0,09 мкГр - проживання в радіусі 30 миль від атомної електростанції протягом року
- 0,1 мкГр - з'їдання одного банана
- 0,3 мкГр - проживання в радіусі 50 миль від вугільної електростанції протягом року
- 10 мкГр - середньодобова доза, отримана від природного радіаційного фону
- 20 мкГр - рентген грудної клітки
- 40 мкГр - 5-годинний переліт літаком
- 600 мкГр – мамографія
- 1 000 мкГр - ліміт дози для індивідуальної сумарної ефективної дози за рік
- 3 650 мкГр - середньорічна доза, отримана від природного фону
- 5 800 мкГр - КТ грудної клітки
- 10 000 мкГр - середня річна доза, отримана від природного фону в Рамсарі, Іран
- 20 000 мкГр - одноразова КТ всього тіла
- 175 000 мкГр - річна доза від природного випромінювання на монациті (Гуарапарі, Бразилія).
- 5 000 000 мкГр - доза, яка вбиває людину з 50% ризиком (отримана протягом короткого часу)

З точки зору біологічних наслідків, дуже важливо розрізняти дози, отримані протягом короткого і тривалого періодів. "Гостра доза" виникає протягом короткого і обмеженого періоду, тоді як "хронічна доза" - це доза, яка набирається протягом тривалого періоду, тому потужність дози краще описує її. Великі дози, як правило, вбивають клітини, тоді як малі - пошкоджують або змінюють їх. Низькі дози, розподілені протягом тривалого часу, не спричиняють негайних проблем з жодним органом тіла. Вплив малих доз опромінення відбувається на клітинному рівні, і результати можуть не проявлятися протягом багатьох років.

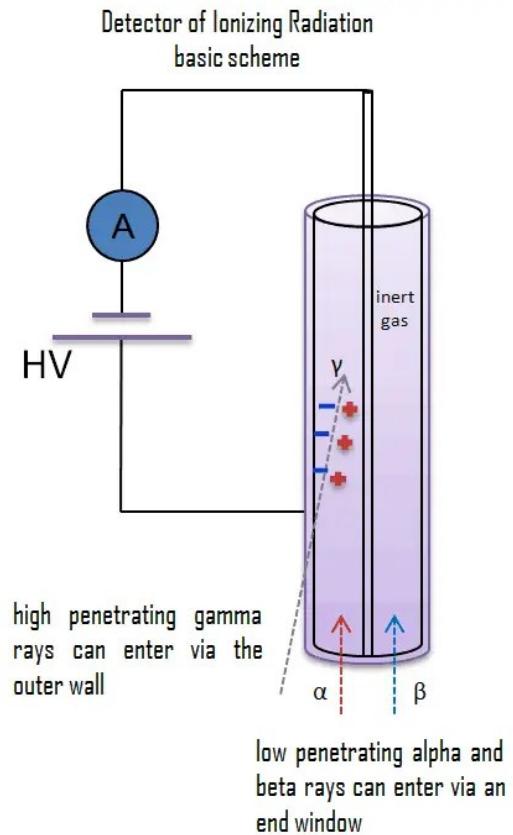


Absorbed – Equivalent – Effective Dose



Величини та одиниці радіації. Висновки.

	SI Units	Other units
Радіоактивність	Беккерель (Бк)	Кюрі (Ки)
Поглинена доза	Грей (Гр)	Рад
Еквівалентна зона	Зіверт (Зв)	Рем
Експозиція	Кулон/кілограм (Кл/кг)	рентген (Р)



Лічильник. Активність або інтенсивність випромінювання вимірюється в одиницях на секунду (cps). Найвідомішим лічильником є лічильник Гейгера-Мюллера. У лічильниках радіації згенерований сигнал від падаючого випромінювання створюється шляхом підрахунку кількості взаємодій, що відбуваються в чутливому об'ємі детектора.

Радіаційний спектрометр. Спектрометри - це прилади, призначені для вимірювання спектрального розподілу потужності джерела, а падаюче випромінювання генерує сигнал, який дозволяє визначити енергію падаючої частинки.

Дозиметр. Дозиметр - це прилад, який вимірює вплив іонізуючого випромінювання. Дозиметри зазвичай реєструють дозу, яка потім є поглинутою енергією випромінювання, що вимірюється в грей (Гр) чи еквівалентною дозою, що вимірюється в зівертах (Зв). Персональний дозиметр - це дозиметр, який носить на поверхні тіла людиною, за якою ведеться спостереження, і реєструє отриману дозу опромінення.

Лічильник Гейгера-Мюллера

Базовий газоіонізаційний детектор складається з камери, заповненої інертним газом, який може бути іонізованим. Центральний дріт є позитивним електродом (анодом), а зовнішній циліндр - негативним електродом (катодом), так що (негативні) електрони притягуються до центрального дроту. Позитивні іони притягуються до зовнішнього циліндра. Анод знаходиться під позитивною для стінки детектора напругою. Коли іонізуюче випромінювання потрапляє в газ між електродами, утворюється скінченна кількість пар іонів. Під впливом електричного поля позитивні іони будуть рухатися до негативно зарядженого електрода (зовнішній циліндр), а негативні іони (електрони) будуть мігрувати до позитивного електрода (центральный дріт). Збір цих іонів створить заряд на електродах і електричний імпульс у ланцюзі виявлення.



Дозиметрія - це вимірювання і розрахунок поглиненої дози іонізуючого випромінювання в речовині та оцінка його потенційного біологічного впливу. Це важлива сфера радіаційної безпеки, яка використовується в різних галузях, таких як охорона здоров'я (радіологія, променева терапія), ядерна енергетика та моніторинг навколишнього середовища.

Радіаційний дозиметр - це прилад, який вимірює поглинену дозу зовнішнього іонізуючого випромінювання. Він носить людину, за якою ведеться спостереження, коли використовується як особистий дозиметр, і є записом отриманої дози опромінення.

Існують різні типи дозиметрів, що використовуються для вимірювання радіаційного опромінення, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування.

Ось кілька найпоширеніших типів:

Термолюмінесцентні дозиметри (ТЛД): Ці дозиметри використовують певні кристали, які накопичують енергію під впливом іонізуючого випромінювання. При нагріванні кристали випромінюють світло, пропорційне кількості отриманого випромінювання.

Дозиметри оптично стимульованої люмінесценції (OSLD): Подібно до TLD, OSLD використовують матеріали, які зберігають енергію випромінювання, але вони зчитуються за допомогою оптичної стимуляції (зазвичай лазером або світлом), а не тепла.

Плівкові дозиметри-жетони: Вони складаються з невеликих шматочків фотоплівки, вкладених у бейдж або тримач. Вплив радіації викликає зміни в щільності плівки, які можна проаналізувати, щоб визначити отриману дозу. Кишенькові іонізаційні камери: Ці портативні пристрої вимірюють іонізацію безпосередньо, зазвичай використовуються в зонах з потенційно високим рівнем радіації.

Електронні персональні дозиметри (EPD): Портативні пристрої, які використовують електронні компоненти для вимірювання та реєстрації радіаційного опромінення в режимі реального часу. Вони часто оснащені сигналізацією, яка попереджає користувачів, коли рівень опромінення перевищує встановлені порогові значення.

Твердотільні дозиметри: Використовуючи напівпровідникові матеріали, ці дозиметри виявляють і вимірюють радіаційне опромінення за допомогою твердотільних пристроїв.



Кожен тип дозиметра має свої переваги та обмеження з точки зору чутливості, точності, вартості та простоти використання, що робить їх придатними для різних застосувань та середовищ.

PERSONAL RADIATION DOSIMETER



OSL - OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE



TLD - THERMOLUMINESCENT DOSIMETER



POCKET DOSIMETER



PL - RADIOPHOTOLUMINESCENCE



FILM BADGE DOSIMETER

Тепловізійний люмінесцентний дозиметр (ТЛД)

Термолюмінесцентний дозиметр (ТЛД) - це безсвітловий прилад, який зазвичай містить кристалічну форму фториду літію, що функціонує як чутливий матеріал ТЛД. Іонізуюче випромінювання змушує деякі електрони в структурі кристалічної ґратки молекули фториду літію поглинати енергію, збуджуючи їх на вищі енергетичні рівні або діапазони.

Електрони можуть повертатися до свого початкового або нормального стану з випромінюванням енергії у вигляді видимого світла. Потім аналізатор вимірює кількість іонізуючого випромінювання, якому піддався ДВУ, і будує криву випромінювання, що відображає опромінення, отримане окремим ДВУ. Цей пристрій точно вимірює опромінення до $1,3 \times 10^{-6}$ Кл/кг (5 мкР) і може використовуватися до трьох місяців. ТЛД можна зчитувати лише один раз, оскільки процес зчитування знищує збережену інформацію.



Кишеньковий іонізаційний камерний дозиметр

Кишенькова іонізаційна камера, що нагадує звичайну авторучку, вважається найбільш чутливим типом індивідуального дозиметра. Існує два типи кишенькових дозиметрів: самозчитувальні та несамозчитувальні. Кишенькова іонізаційна камера містить два негативно заряджені електроди, один з яких позитивно заряджений. Під впливом гамма- та рентгенівського випромінювання повітря навколо попередньо зарядженого центрального або позитивного електрода стає іонізованим. Згодом негативні іони в повітрі притягуються до позитивно зарядженого центрального електрода, нейтралізуючи його заряд. Це призводить до розрядки механізму прямо-пропорційно до кількості радіації, якій піддався пристрій. Ці прилади дорогі, коштують до 150 доларів за одиницю, і якщо їх не зчитувати щодня, можуть давати неточні показники.



Дозиметр оптично стимульованої люмінесценції (ОСЛ)

Другим за чутливістю серед радіаційних дозиметрів є дозиметр оптично стимульованої люмінесценції або ОСЛ-дозиметр. Це найпоширеніший тип дозиметра для персоналу, який сьогодні використовується для моніторингу професійного опромінення в діагностичній радіології. Цей тип дозиметра є легким, міцним і зручним для перенесення. Він містить детектор на основі оксиду алюмінію і зчитує показання за допомогою лазерного випромінювання на певних частотах. Коли лазерне світло потрапляє на чутливий матеріал, він починає люмінесцювати пропорційно до кількості опромінення, яке він отримав. Дозиметр OSL можна носити до одного року, але зазвичай його носять лише 1-3 місяці перед зняттям показань. Ці прилади забезпечують точність зчитування до 10 мкЗв для рентгеновських і гамма-фотонів з енергією від 5 кеВ до понад 40 МеВ.



Цифрові іонізаційні дозиметри для персоналу

Компактні професійні персональні цифрові іонізаційні дозиметри були розроблені та призначені для моніторингу та вимірювання потужності еквівалентної дози як гамма-випромінювання, так і в діапазоні від 20 кеВ до 10 МеВ. Цей тип дозиметра, який має невеликий розмір і зовні схожий на флеш-накопичувач, забезпечує негайне вимірювання радіаційного опромінення. Він дозволяє вручну або автоматично реєструвати до 4000 подій зміни потужності дози, рівні гострої дози, а також час і рівні перевищення поточних порогових значень. Дозиметр зв'язується з ПК через USB-канал з одночасною зарядкою акумулятора. Крім того, він містить програмне забезпечення Personal Dose Tracker, яке дозволяє аналізувати показання дози та створювати звіти. Деякі з цих звітів включають, але не обмежуються ними, зведення про радіаційне опромінення, детальний звіт про історію та звіт про те, хто не користувався цим приладом. Деякі з них містять GPS, систему глобального позиціонування або мікрочіп, який також додає дані про місцезнаходження подій опромінення.



Лічильник Гейгера-Мюллера

Базовий газоіонізаційний детектор складається з камери, заповненої інертним газом, який може бути іонізованим. Центральний дріт є позитивним електродом (анодом), а зовнішній циліндр - негативним електродом (катодом), так що (негативні) електрони притягуються до центрального дроту. Позитивні іони притягуються до зовнішнього циліндра. Анод знаходиться під додатньою для стінки детектора напругою. Коли іонізуюче випромінювання потрапляє в газ між електродами, утворюється скінченна кількість пар іонів. Під впливом електричного поля позитивні іони будуть рухатися до негативно зарядженого електрода (зовнішній циліндр), а негативні іони (електрони) будуть мігрувати до позитивного електрода (центральный дріт). Збір цих іонів створить заряд на електродах і електричний імпульс у колі виявлення.

Пластикові сцинтилятори

Пластикові сцинтиляційні дозиметри випромінюють світло при опроміненні. Сцинтиляція може зчитуватися фотоприймачем і корелюватися з поглинутою дозою. Пластикові сцинтилятори мають кілька бажаних якостей, включаючи майже тканинну еквівалентність, малий розмір, обмежений здатністю виявляти малі кількості випромінювання, і енергетичну незалежність в діапазоні середніх частот. Ці якості роблять сцинтилятори цінними детекторами для застосування в дозиметрії малих полів, масивів детекторів з високою роздільною здатністю (IMRT QA), а також, оскільки коефіцієнт зупинки зіткнень у пластику подібний до води, для вимірювання електронів.

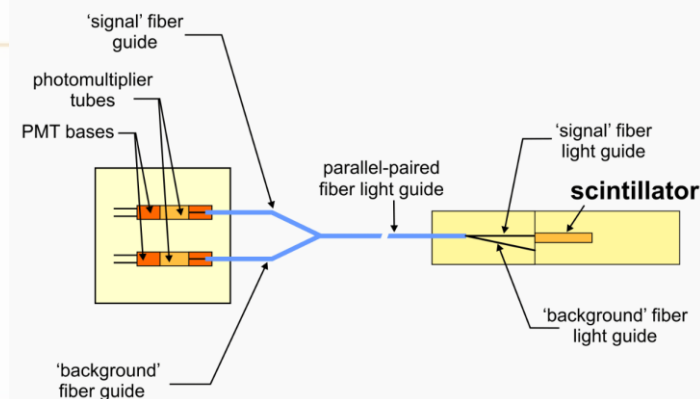
Хоча пластикові сцинтилятори добре працюють для виявлення гамма- і бета-частинок, інші сцинтиляційні матеріали також широко використовуються.

- NaI(Tl): виявлення фотонів низької енергії (приблизно до 360 кеВ).
- ZnS: виявлення альфа-частинок.



<https://oncologymedicalphysics.com/geiger-counters/>

Dual Light Pipe Plastic Scintillator



Дозиметрія



Brass Window

Mica Window



Detachable Probe

Детектори нейтронів

Бульбашкові детектори складаються з прозорої пластикової трубки, заповненої гелевим полімером. Коли швидкі нейтрони потрапляють на полімер, вони перегрівають його, створюючи бульбашки. Ці бульбашки залишаються підвішеними в гелі і можуть бути підраховані для визначення потоку нейтронів або поглиненої дози. Бульбашкові камери здатні вимірювати як швидкі, так і, з додаванням поглинача нейтронів, наприклад, хлору. Ці особливості роблять бульбашкові детектори добре придатними для вимірювання нейтронів у сховищі.

Вимірювання

1. Кришка бульбашкового детектора відкручується, зменшуючи тиск в камері і дозволяючи проводити вимірювання.
2. Детектор опромінюється нейтронами. Взаємодія нейтронів перегріває полімер, утворюючи бульбашки.
3. Бульбашки підраховуються на око або оптично. Кількість бульбашок корелює з поглинутою дозою.
4. Бульбашковий детектор обнуляється закручуванням кришки.



Переваги

Корисний для вимірювань у склепіннях
 Хороше відхилення фотонів
 Підходить для високої потужності дози
 Відсутність часу простою
 Невеликий розмір
 Використовується для дозиметрії персоналу
 Багаторазовий
 Доступні в різних енергетичних діапазонах від теплового до швидкого

Недоліки

Може мати сильну температурну залежність (5% на C).
 Цю залежність можна зменшити, додавши в камеру летючу рідину, тиск парів якої компенсує температурну чутливість.
 Перекриття бульбашок ускладнює зчитування при вимірюванні високих доз.
 Може втрачати чутливість з часом через деградацію середовища.



Дозиметри найчастіше використовуються фахівцями в промисловості та медицині, а також працівниками аварійно-рятувальних служб.

Типові сфери застосування дозиметрів

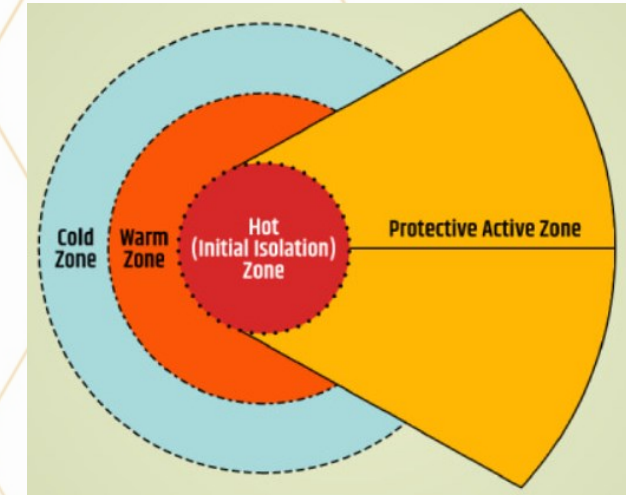
- Ядерна енергетика;
- Радіологія; онкологія;
- Ядерна медицина;
- Будівництво;
- Морський транспорт;
- Громадська безпека.

Працівники використовують персональні дозиметри для визначення підвищеної дози опромінення. Деякі дозиметри можуть попереджати про використання надзвичайно шкідливих доз радіації, коли інші є частиною програми регулювання та захисту від підвищеної дози опромінення. Радіація та захист працівників від високих доз опромінення. Існує три основні зони регулювання при обробці радіаційного інциденту:

Холодна зона - це зона, вільна від забруднення, яка сприяє проведенню операцій і критичного планування для усунення радіації від аварійного інциденту. Рівень радіації в цій зоні знаходиться на рівні фонові дози.

Тепла зона - це зона забруднення, яка знаходиться між холодною і гарячою зонами.

Гаряча зона безпосередньо оточує місце радіаційного забруднення. Тут суворо вимагається використання належних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Персональні дозиметри використовуються фахівцями з надзвичайних ситуацій у цих регульованих зонах, і вони будуть сповіщені, коли рівень радіації стане небезпечним.



Джерела природного радіаційного фону

Природні джерела іонізуючого випромінювання :

Космічне випромінювання

Земне випромінювання

Внутрішнє випромінювання

Природний радіаційний фон. Космічне випромінювання

Три основні джерела космічного випромінювання:

Сонячне випромінювання - високоенергетичні частинки (переважно протони), які випромінює Сонце.

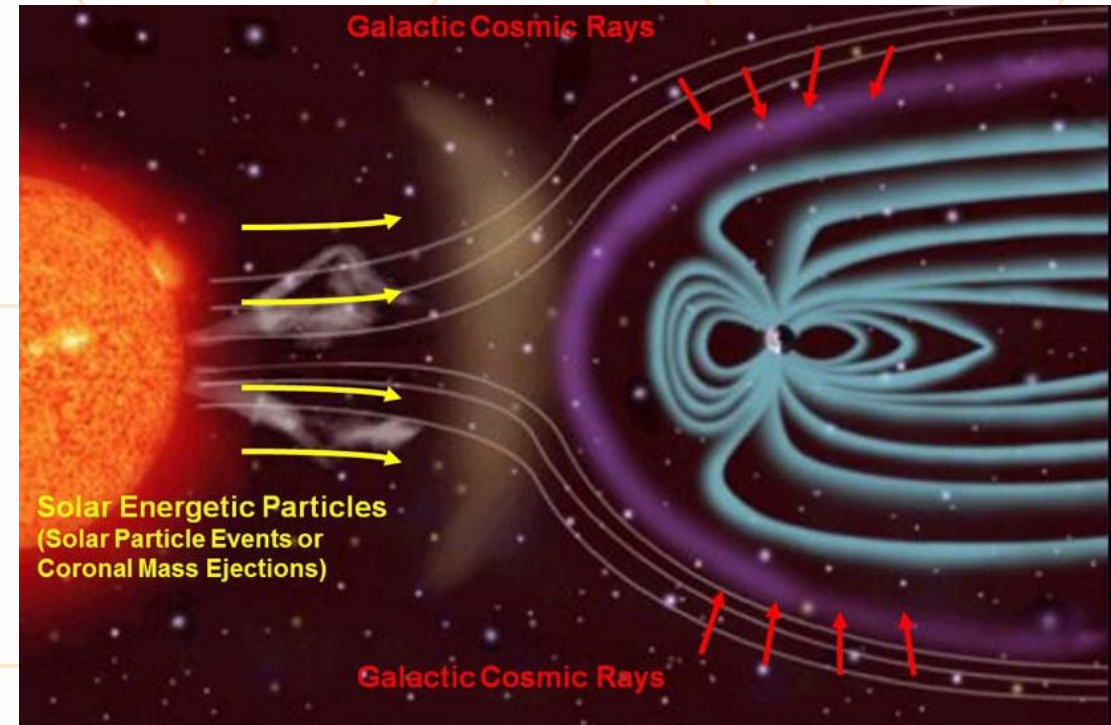
Галактичне космічне випромінювання - високоенергетичні частинки, що виникають за межами Сонячної системи (в Галактиці).

Випромінювання від радіаційних поясів Землі (поясів Ван Аллена).

Радіаційні пояси Ван Аллена - це зони високоенергетичних частинок (особливо протонів), захоплених магнітним полем Землі.

Річна доза космічного випромінювання на рівні моря становить близько **0,25-0,35 мЗв**. Якщо ви живете на більшій висоті або часто літаєте літаками, це опромінення може бути значно більшим, оскільки атмосфера тут розріджена. *Вплив магнітного поля Землі також визначає дозу космічного випромінювання.*

Потужність дози на рівні землі становить близько **0,04 мкЗв/год**, але на максимальній висоті польоту (10 км) - близько **1 мкЗв/год**.



Природний радіаційний фон. Земне випромінювання

Джерела природного радіаційного фону
Природні джерела іонізуючого випромінювання :

Космічне випромінювання

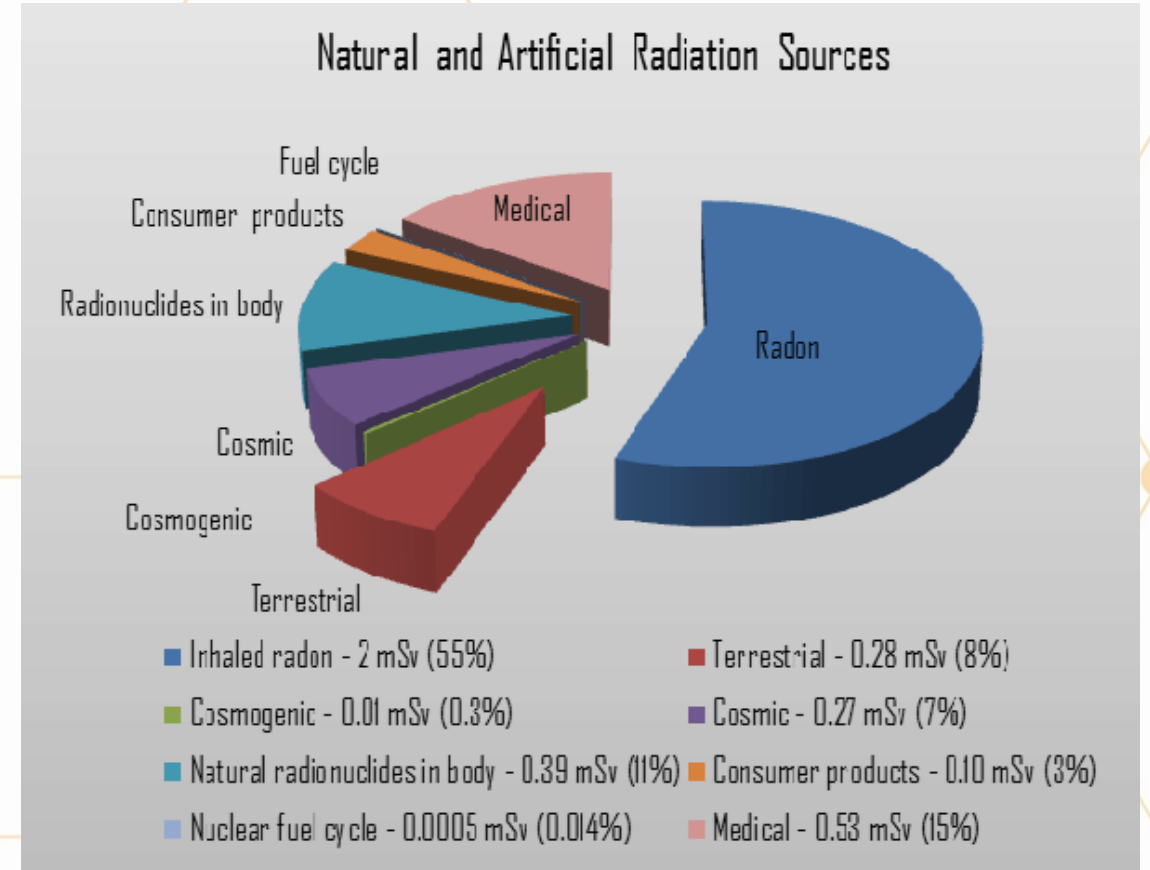
Земне випромінювання

Внутрішнє випромінювання

Основними джерелами наземної радіації є гірські породи, ґрунт і водні джерела випромінювання.

Річна доза наземного опромінення становить близько **0,20-0,35 мЗв** (за винятком опромінення радоном).

Основними ізотопами для земної радіації є уран і продукти його розпаду (торій, радій і радон).



Джерела природного радіаційного фону

Природні джерела іонізуючого випромінювання :

Космічне випромінювання

Земне випромінювання

Внутрішнє випромінювання

Природний радіаційний фон. Земне випромінювання. Радон

Радон - це безбарвний благородний газ без запаху, що зустрічається в природі як продукт розпаду радію. Всі ізотопи радону радіоактивні, з них два ізотопи радону **радон-222** і **радон-220** є дуже важливими з точки зору радіаційного захисту.

Основна проблема полягає в тому, що радон - це газ

Період напіврозпаду радону-222 становить лише **3,8 дні**. Газ радон безперервно просочується з гірських порід і накопичується (через свою високу щільність) у погано провітрюваних будинках.

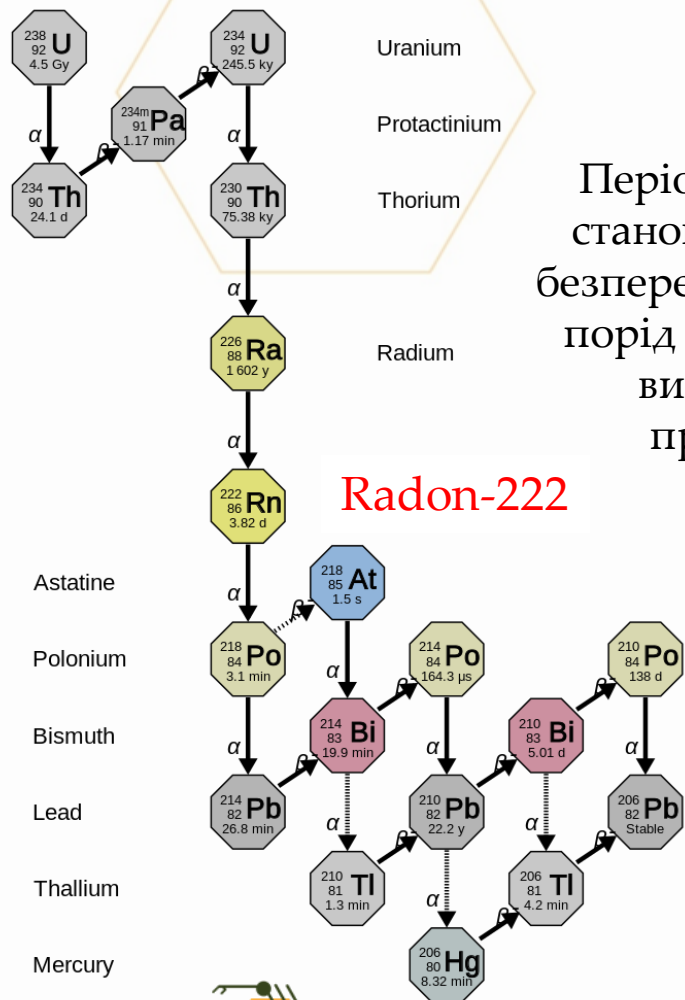
Радон, як правило, є найбільшим природним джерелом радіації, що сприяє опроміненню населення, на його частку припадає половина загального опромінення від усіх джерел.

Ризик для здоров'я, пов'язаний з опроміненням радоном, виникає, головним чином, через вдихання короткоживучих продуктів розпаду (Pb-210 і Po-210) і, як наслідок, опромінення бронхів і легенів альфа-частинками.

(Поки ці ізотопи знаходяться поза організмом, дозу опромінення може дати лише гамма-випромінювання).

Середньорічна доза опромінення людини від радону становить близько **2 мЗв/рік** і може змінюватися на багато порядків у різних місцях.

Через свою високу густину **радон** може накопичуватися підвалах. **Радон** також може міститися в підземних водах - наприклад, у деяких джерельних водах і гарячих джерелах.



<https://habr.com/ru/articles/368041/>

Джерела природного радіаційного фону

Природні джерела іонізуючого випромінювання :

Космічне випромінювання

Земне випромінювання

Внутрішнє випромінювання

Природний радіаційний фон. Внутрішнє випромінювання.

Основними джерелами внутрішнього опромінення є **радіоактивні ізотопи**, що знаходяться в організмі від народження.

Це ізотопи калію-40, вуглецю-14, а також ізотопи урану і торію. Середньорічна доза опромінення людини від внутрішніх радіоактивних матеріалів, крім радону, становить близько 0,3 мЗв/рік, з яких

0,2 мЗв/рік надходить від калію-40, **0,12 мЗв/рік** - від уранового та торієвого рядів, **12 мкЗв/рік** - від вуглецю-14.

Найбільший вклад з точки зору дози вносить калій-40. *Домінуючим компонентом інгаляційного опромінення є короткоживучі продукти розпаду радону.*

60-кілограмова людина накопичує близько 120 г калію (0,2%), який переважно знаходиться в м'язах. Концентрація калію-40 майже однакова у всіх людей на рівні 60 Бк/кг (загалом 4000 Бк), що відповідає річній ефективній дозі **0,2 мЗв**.

Перенесення іонів калію через мембрани нервових клітин необхідне для нормальної передачі нервових імпульсів. Калій-40 - радіоактивний ізотоп калію, який має дуже довгий період напіврозпаду $1,251 \times 10^9$ років і піддається обом типам бета-розпаду.

Доза, яка дорівнює банановому еквіваленту - це величина дози опромінення іонізуючого випромінювання (**0,1 мкЗв**).

Банани містять дуже високу концентрацію калію, який є життєво важливим для функціонування всіх живих клітин.

Radioactive materials in the body



When body weight is 60kg

Potassium-40	※ 1	4,000Bq
Carbon-14	※ 2	2,500Bq
Rubidium-87	※ 1	500Bq
Tritium	※ 2	100Bq
Lead and polonium	※ 3	20Bq

- ※ 1 Nuclides originating from the Earth
- ※ 2 Nuclides derived from N-14 originating from cosmic rays
- ※ 3 Nuclides of the uranium series originating from the Earth



Дві групи, які зазнали впливу промислових джерел іонізуючого випромінювання.

Опромінення населення - це опромінення окремих представників громадськості та населення в цілому

- ✓ Медичне опромінення
- ✓ Діагностичне рентгенівське випромінювання
- ✓ Процедури ядерної медицини
- ✓ Споживчі товари
- ✓ Будівельні та дорожньо-будівельні матеріали
- ✓ Сигарети для куріння (полоній-210)
- ✓ Паливо, включаючи газ і вугілля
- ✓ Рентгенівські системи безпеки
- ✓ Телевізори
- ✓ Детектори диму, ліхтарні плафони

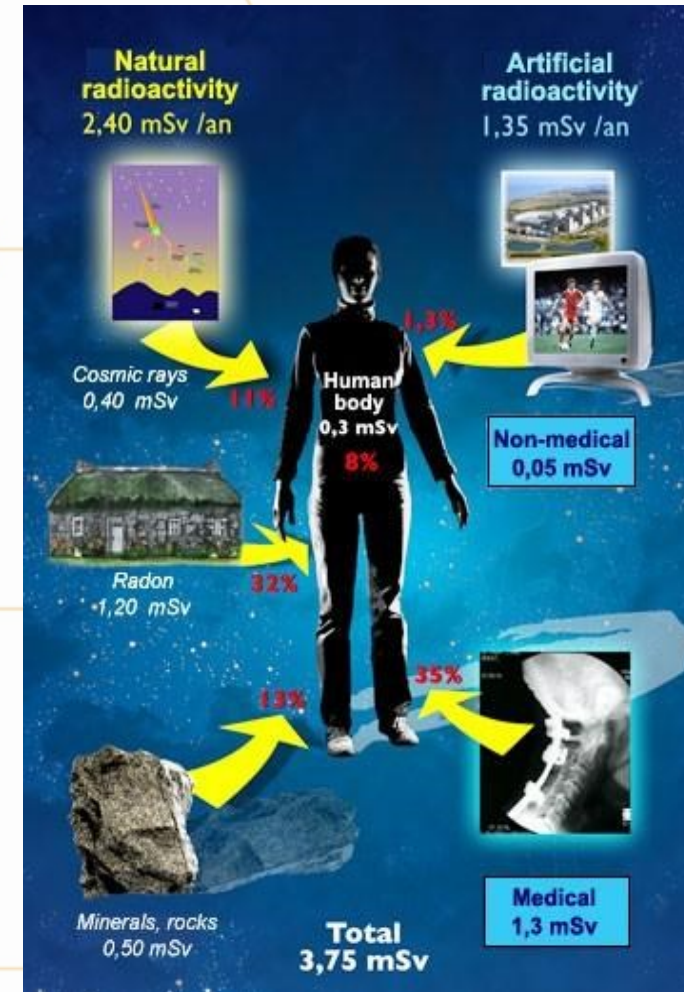
Професійне опромінення - це опромінення працівників у ситуаціях, коли їхнє опромінення безпосередньо пов'язане з їхньою роботою

- ✓ Об'єкти паливного циклу
- ✓ Промислова радіографія
- ✓ Радіологічні відділення (медичні)
- ✓ Відділення ядерної медицини
- ✓ Відділення радіаційної онкології
- ✓ Атомні електростанції
- ✓ Урядові та університетські дослідницькі лабораторії



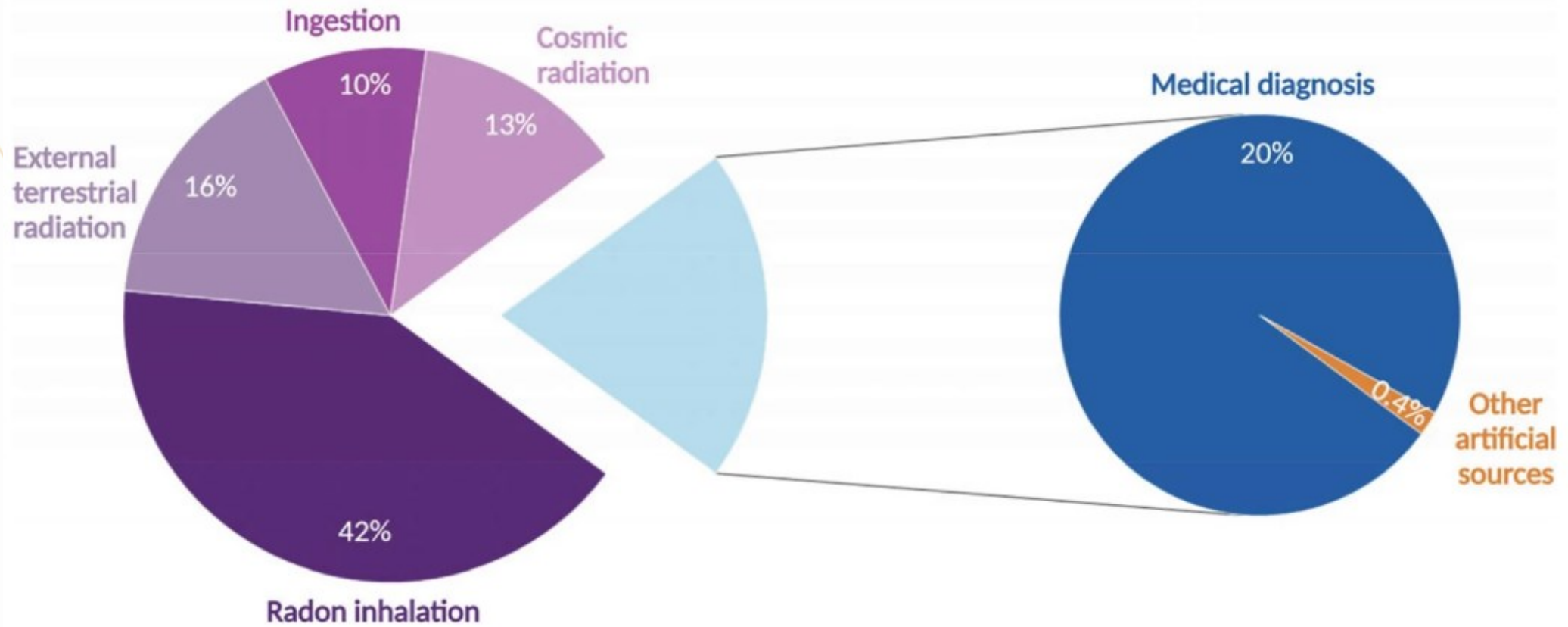
Штучні джерела радіоактивного випромінювання

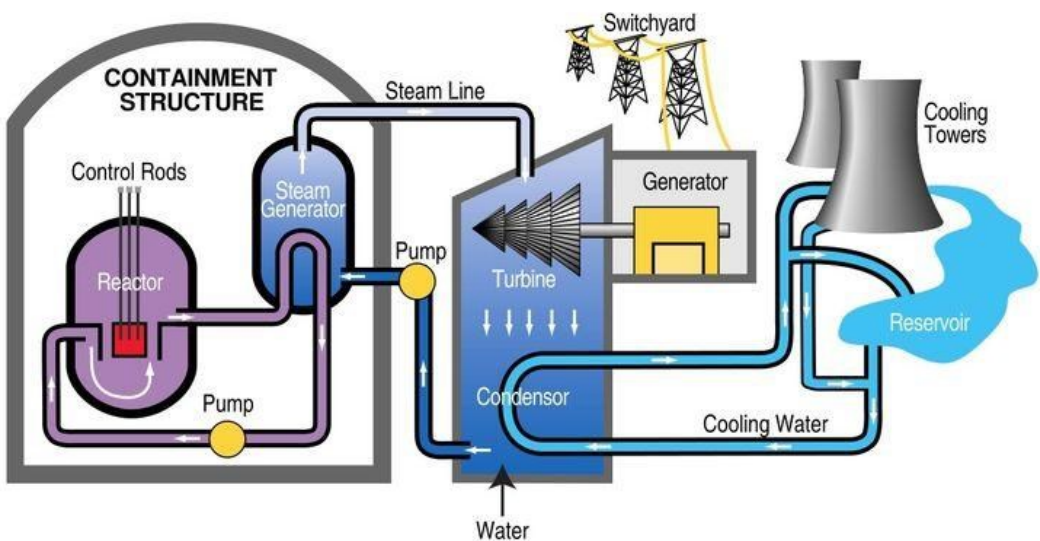
Іонізуюче випромінювання має багато промислових і медичних застосувань. Штучні джерела включають медичне використання радіації, відходи при ядерних випробуваннях, промислове використання радіації, телебачення та численні інші пристрої, що виробляють радіацію.



Natural sources: 80%

Artificial sources: 20%





Атомна електростанція - це теплова електростанція, на якій ядерний реактор виробляє тепло, що використовується для утворення пари, яка приводить в дію парову турбіну, з'єднану з генератором, який виробляє електроенергію.

Ядерний реактор – пристрій для здійснення і підтримання ядерної реакції поділу ядер важких елементів вільними нейтронами. Поділ супроводжується виділенням енергії, яка перетворюється в теплову в результаті зупинення осколків ядер. *У центральній частині реактора розташована активна зона, в якій проходить ядерна реакція.* Вона складається з уповільнювача з технологічними каналами, всередині яких знаходяться тепловідляючі зборки (ТВЗ). ТВЗ складаються з *тепловідляючих елементів, стержнів, серцевина яких вироблена з ядерного палива, охоплених оболонкою, або конструкційним матеріалом.* Теплота, яка виділяється в ТВЕЛах і дорівнює 90 % усієї ядерної енергії поділу, виводиться з реактора потоком рідкої чи газоподібної речовини – теплоносієм по системі тепловідбору. Активній зоні надають форму кулі або циліндра і поміщають її в корпус, що дозволяє робити ТВЕЛи однакових розмірів. Щоб реакція не зупинилась і не стала надкритичною, в активну зону вводять компенсуючі стержні з матеріалів, які добре поглинають нейтрони.

Пуск і зупинка реактора, перехід з одного рівня потужності на інший і підтримання його в критичному стані забезпечуються регулюючими стержнями. При аварійних ситуаціях в роботу вступають стержні аварійного захисту. Ядра U^{238} , які не розділились після захоплення нейтронів, перетворюються в ядра Pt^{239} . З метою отримання якомога більшої кількості Pt^{239} активну зону екранують і називають зоною відновлення. Для зниження радіації до безпечного рівня і створення нормальних умов праці реактор екранують біологічним екраном, до складу якого входить сповільнювач "швидких" нейтронів. Це може бути вода, свинець, залізо чи бетон, який містить залізну руду.

Інші компоненти АЕС:

Парова турбіна - це пристрій, який теплову енергію з пари під тиском використовує для виконання механічної роботи на обертовому вихідному валу.

Генератор - це пристрій, який перетворює механічну енергію парової турбіни в електричну.

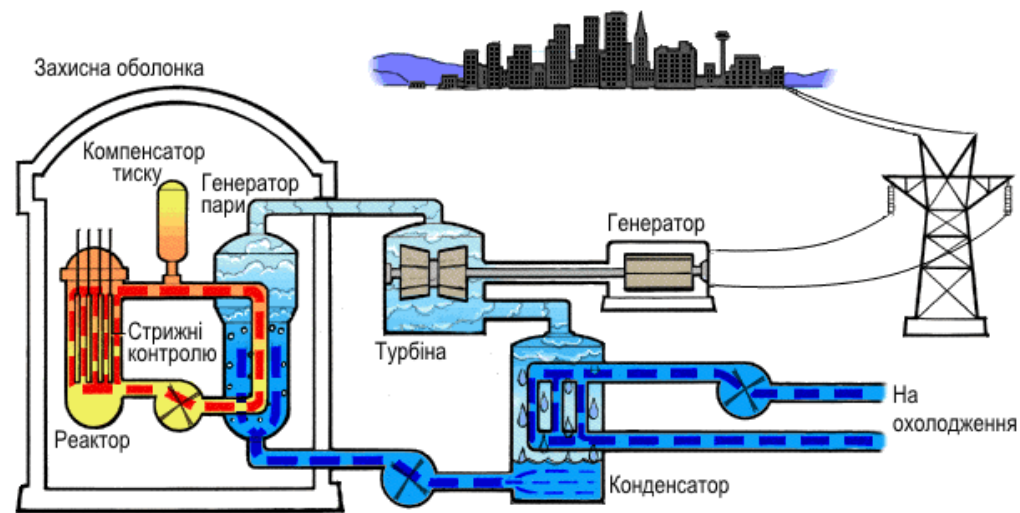
Конденсатор - це теплообмінник, який використовується для конденсації пари з останнього ступеня турбіни.

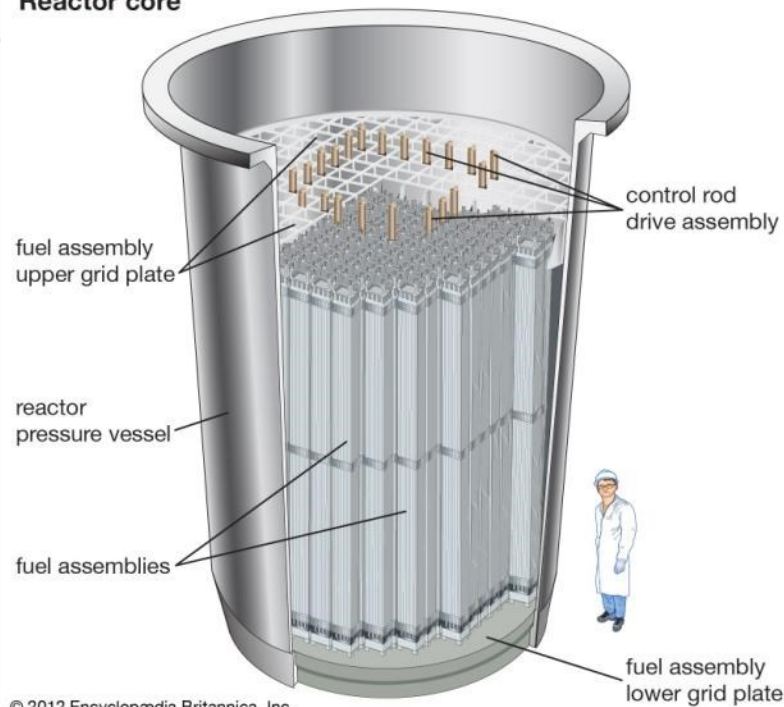
Система конденсат-рідина. Системи живлення конденсату виконують дві основні функції. Подати достатню кількість якісної води (конденсату) в парогенератор і нагріти воду (конденсат) до температури, близької до насичення.

Перегрівачі сепаратора вологи зазвичай встановлюють між випускним отвором турбіни високого тиску та входом турбіни низького тиску для видалення вологи з вихлопної пари високого тиску турбіни та повторного нагрівання цієї пари перед тим, як її подати до турбін низького тиску.

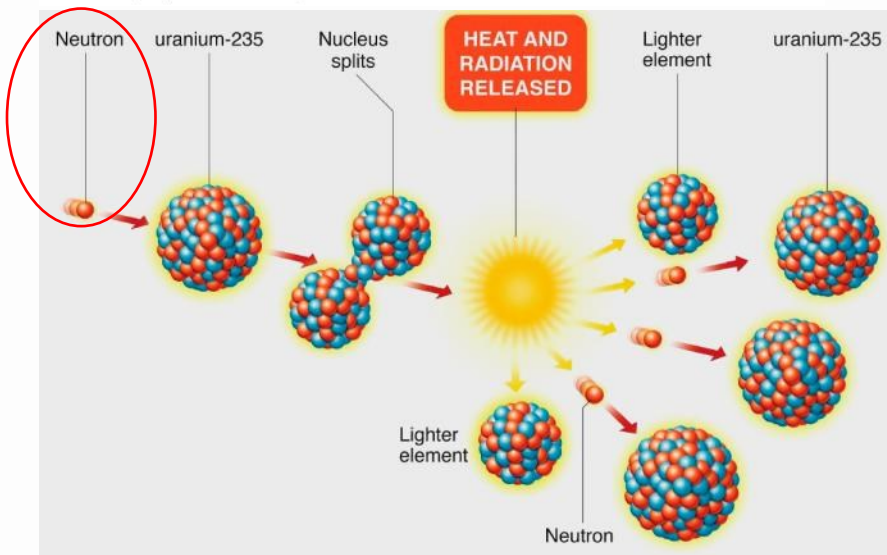
Охолоджувальна система. Основною функцією системи охолодження на електростанціях є охолодження парового контуру для конденсації пари низького тиску та її рециркуляції. Оскільки пара у внутрішньому контурі конденсується назад у воду, надлишок (відпрацьоване) тепло, видалене з нього, потрібно відводити шляхом передачі в повітря або водойму.

Контрольно-вимірювальні прилади та система керування. Контрольно-вимірювальна система виконує роль центральної нервової системи атомної електростанції.





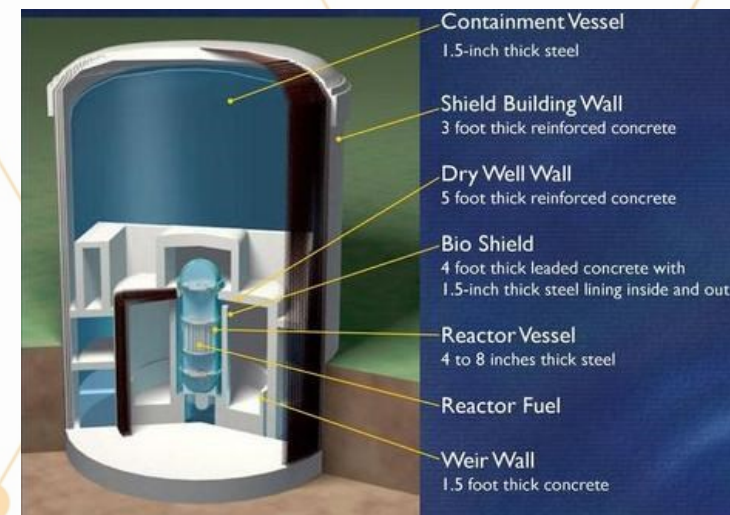
© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.



Будь-який ядерний реактор, який виробляє енергію шляхом поділу урану (U-235) або плутонію (Pu-239) під час бомбардування нейтронами повинен мати щонайменше **п'ять компонент**:

ядерне паливо, що складається з матеріалів, які розщеплюються, - урану-235 або плутонію-239; **ядерний сповільнювач** - сповільнює нейтрони для ініціювання поділу; **теплоносій реактора** - речовина, що циркулює через ядерний реактор для відведення або передачі тепла (найчастіше - вода); інші можливі теплоносії - важка вода, повітря, вуглекислий газ, гелій, рідкий натрій або натрієво-калієвий сплав. **регулюючі стрижні** - стрижні або трубки, що містять матеріал, який поглинає нейтрони, наприклад, бор, гафній, кадмій, які використовуються для управління потужністю ядерного реактора; регулюючий стрижень виймається з активної зони реактора або вводиться в неї для збільшення або зменшення реактивності реактора (збільшення або зменшення потоку нейтронів); це, в свою чергу, впливає на теплову потужність реактора, кількість виробленої пари, а отже, на вироблену електроенергію.

екран/система захисту встановлюється навколо реактора, щоб утримувати будь-яке випромінювання від витоку в навколишнє середовище; зазвичай виготовлений зі свинцю або спеціальних видів пластику, екран необхідний як для транспортування, так і для зберігання джерел радіоактивних нейтронів.

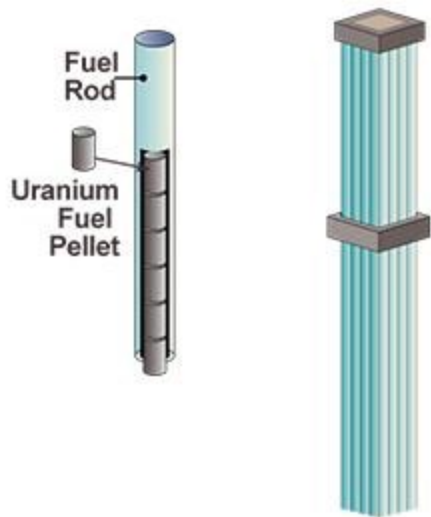
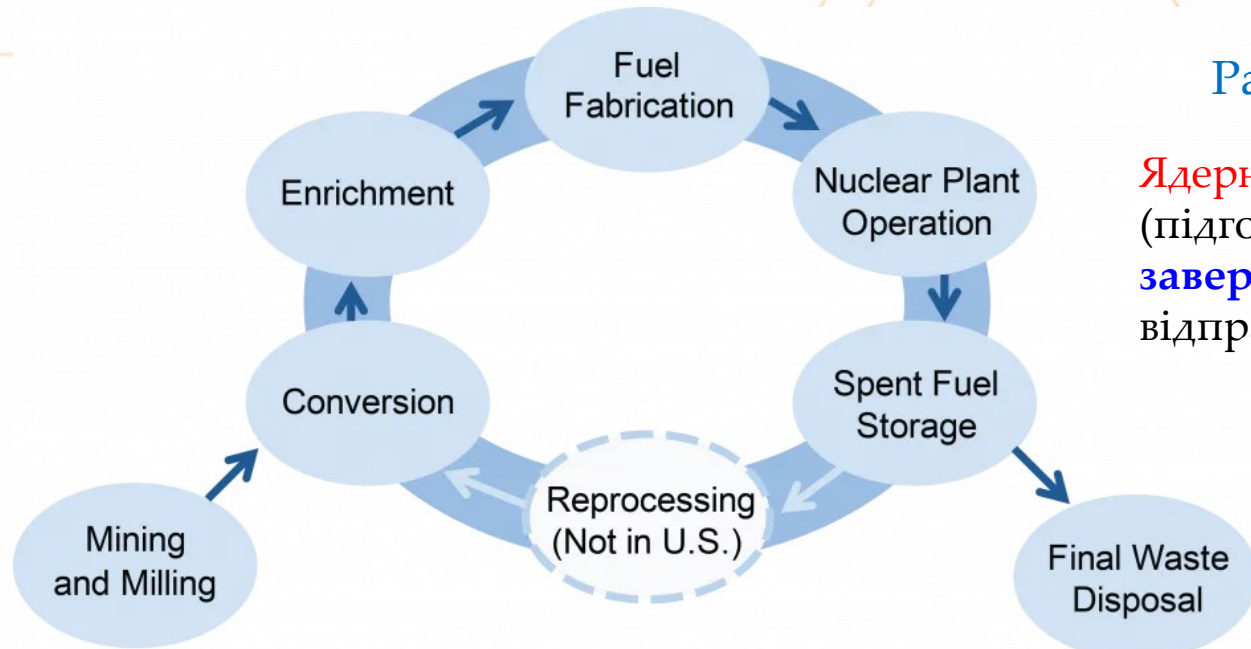


Радіаційне опромінення від ядерного паливного циклу

Ядерний паливний цикл складається з етапів: **початкового** (підготовка палива), **період експлуатації** (вигорання палива), **завершального етапу** (переробка або захоронення відпрацьованого ядерного палива).

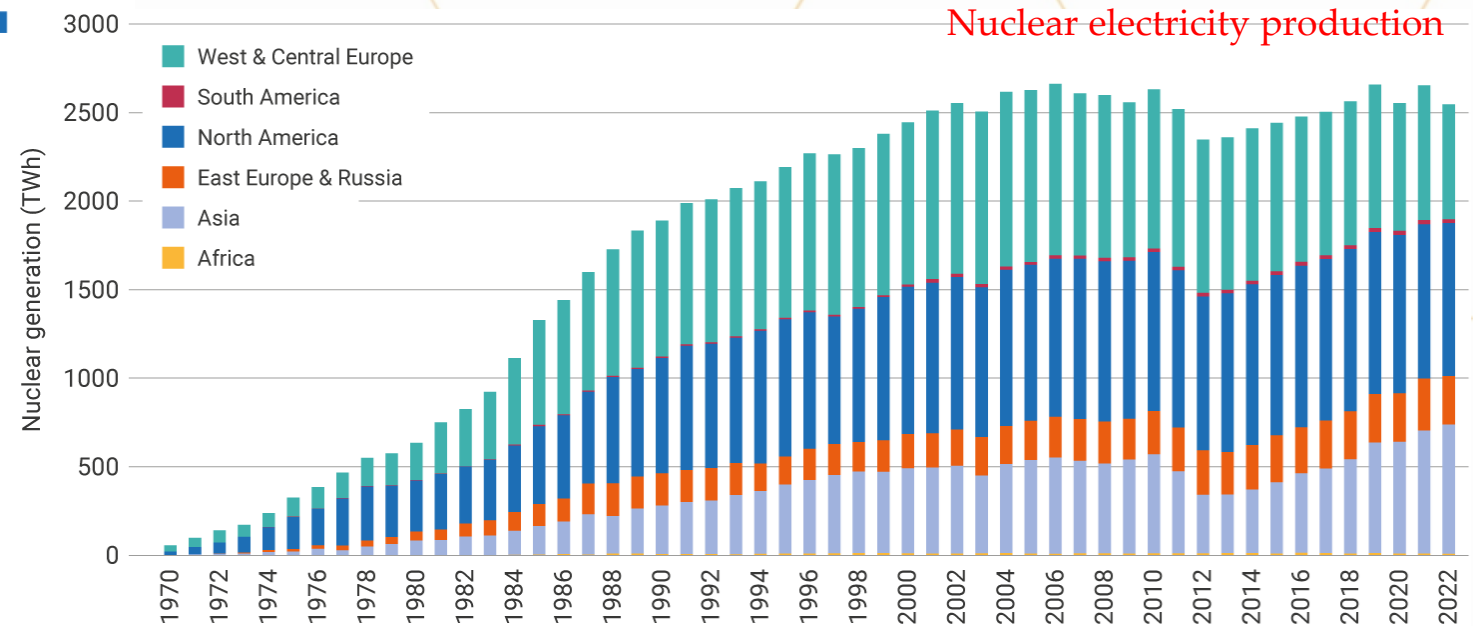
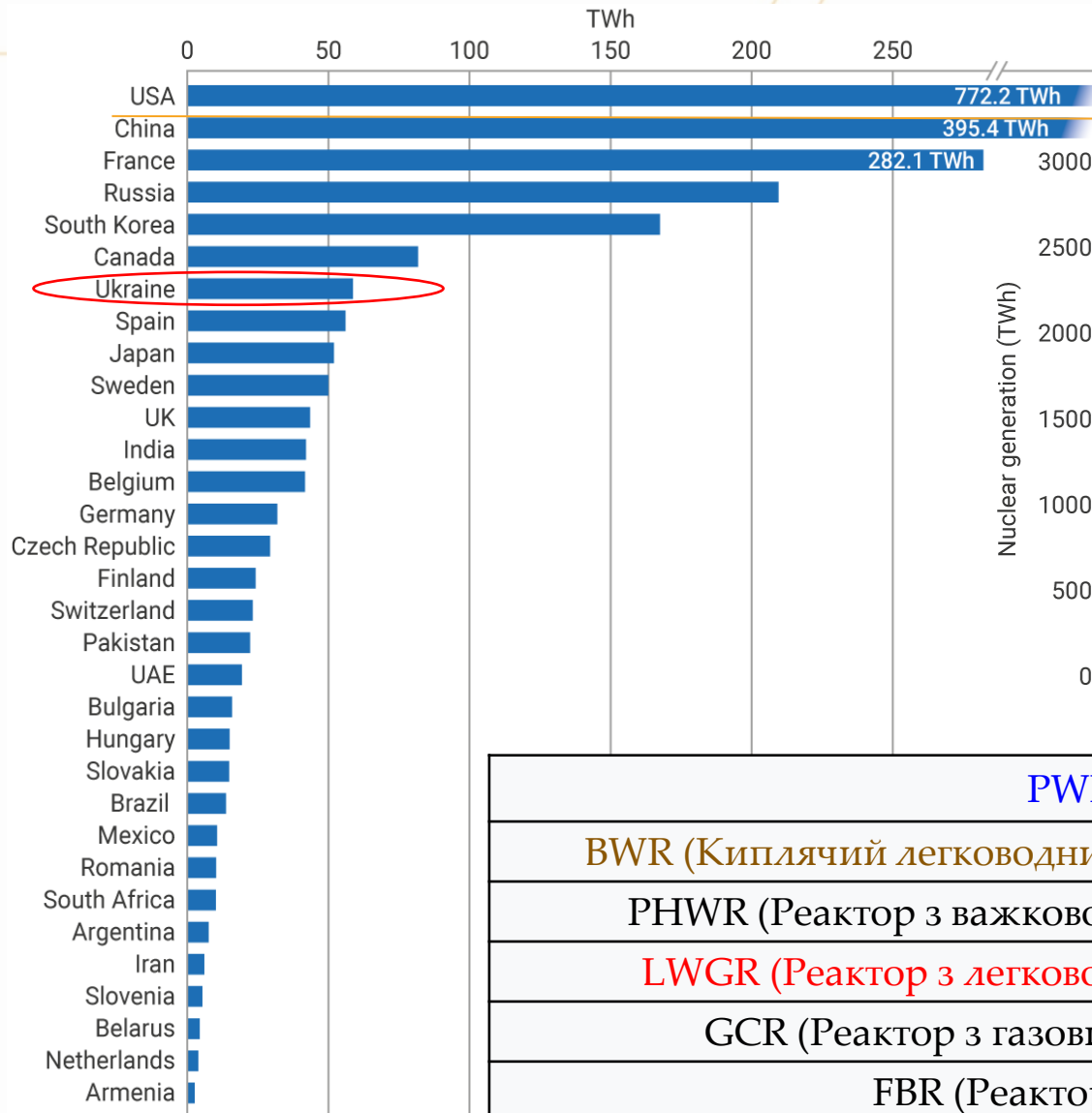
Радіаційне випромінювання від ядерного паливного циклу оцінюється протягом усього життєвого циклу ядерного палива, що включає в себе *видобуток та збагачення урану, виготовлення паливних збірок, експлуатація електростанції (за винятком аварій), зберігання або переробка відпрацьованого палива, захоронення радіоактивних відходів, діяльність зі зняття з експлуатації.*

Доза, яка виникає в результаті ядерного паливного циклу, **становить 130 бер** для ядерного паливного циклу (половина внеску в опромінення населення від ядерного паливного циклу припадає на викиди радіонуклідів під час видобутку урану).



Fuel assembly
Spent fuel assemblies are typically 14 feet (4.3 meters) long and contain nearly 200 fuel rods for PWRs and 80–100 fuel rods for BWRs.





Nuclear electricity production

PWR (реактор з водою під тиском)	297
BWR (Киплячий легководний реактор з водяним охолодженням і сповільнювачем)	75
PHWR (Реактор з важководним сповільнювачем та охолодженням під тиском)	49
LWGR (Реактор з легководним охолодженням і графітовим сповільнювачем)	15
GCR (Реактор з газовим охолодженням і графітовим сповільнювачем)	14
FBR (Реактор-розмножувач на швидких нейтронах)	3

Ядерна енергетика зараз виробляє близько 10% світової електроенергії на близько 450 реакторах.

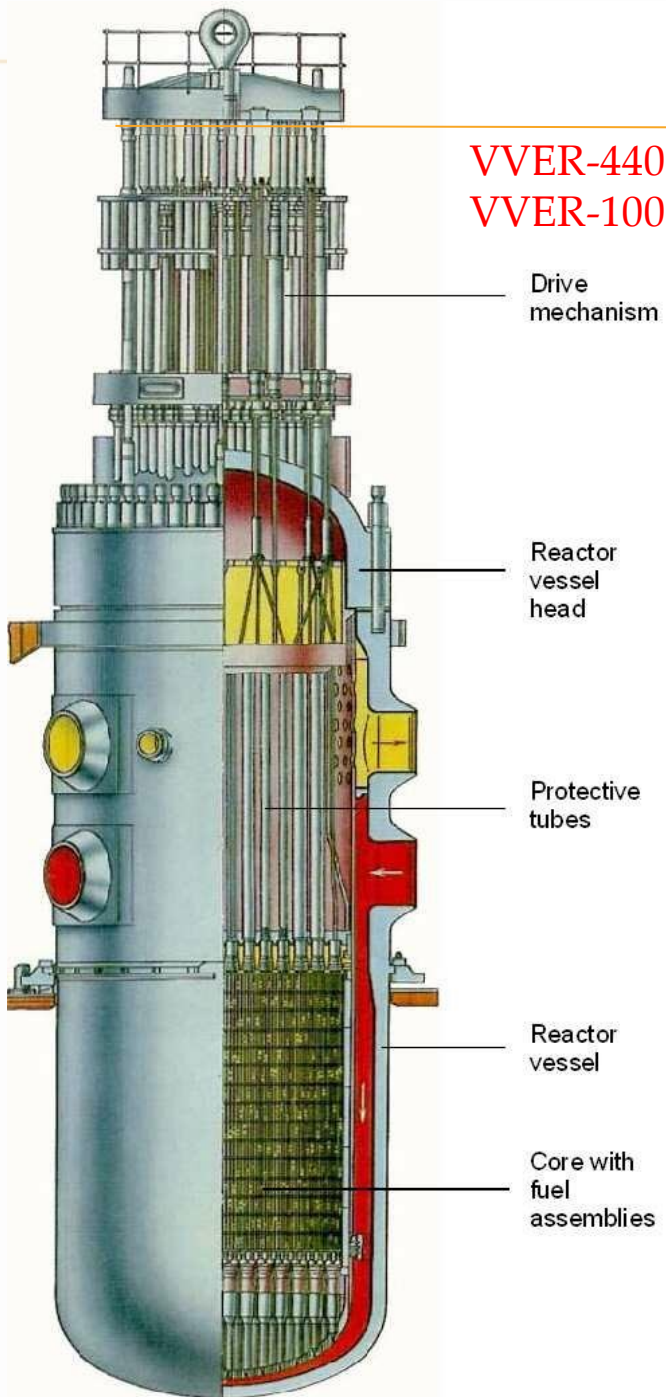
Атомна енергетика забезпечує близько чверті низьковуглецевої електроенергії у світі.

Атомна енергетика є другим за величиною джерелом низьковуглецевої енергії у світі (26% від загального обсягу у 2020 році).

Понад 50 країн використовують ядерну енергію на близько 220 дослідницьких реакторах.

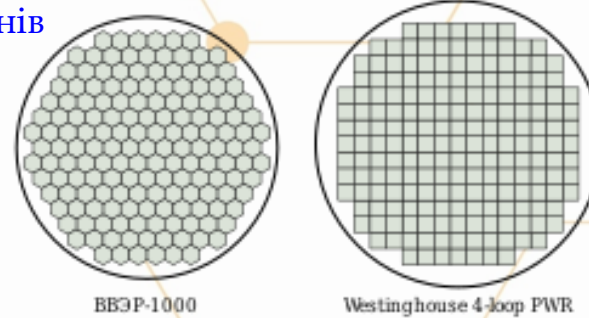


VVER-440
VVER-1000



ВВЕР-1000 (транслітерація російського ВВЭР-1000), російський ядерний енергетичний реактор типу PWR потужністю 1000 МВт.

Приводи регулюючих стрижнів
Головка корпусу реактора
Корпус реактора під тиском
Вхідні та вихідні сопла
Активна зона реактора
Паливні стрижні



Розробник – Інститут імені Курчатова, Росія - енергетичний реактор з водяним охолодженням

Паливні стрижні реактора повністю занурені у воду під тиском близько 15 МПа, щоб вона не закипала при нормальних робочих температурах (від 220 до понад 320 °С). Вода в реакторі слугує одночасно і теплоносієм, і сповільнювачем, що важливо для безпеки. Якщо циркуляція теплоносія припиняється, ефект сповільнення нейтронів водою зменшується через підвищення температури, що створює бульбашки пари, які не сповільнюють нейтрони, таким чином зменшуючи інтенсивність реакції і компенсуючи втрату охолодження - стан, відомий як від'ємний коефіцієнт. Паливо - це низькозбагачений (2,4-4,4% ^{235}U) діоксид урану (UO_2) або його еквівалент, спресований в гранули і зібраний в паливні стрижні. Реактивність контролюється регулюючими стрижнями, які можна вставляти в реактор зверху. Ці стрижні виготовлені з матеріалу, що поглинає нейтрони, і, залежно від глибини введення, перешкоджають ланцюговій реакції. У разі виникнення аварійної ситуації, зупинка реактора може бути виконана шляхом повного введення стрижнів управління в активну зону.

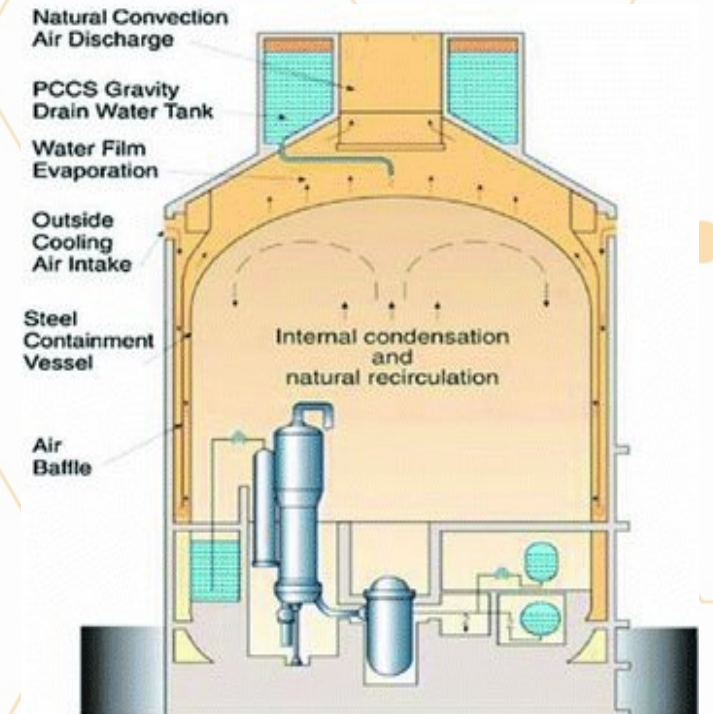
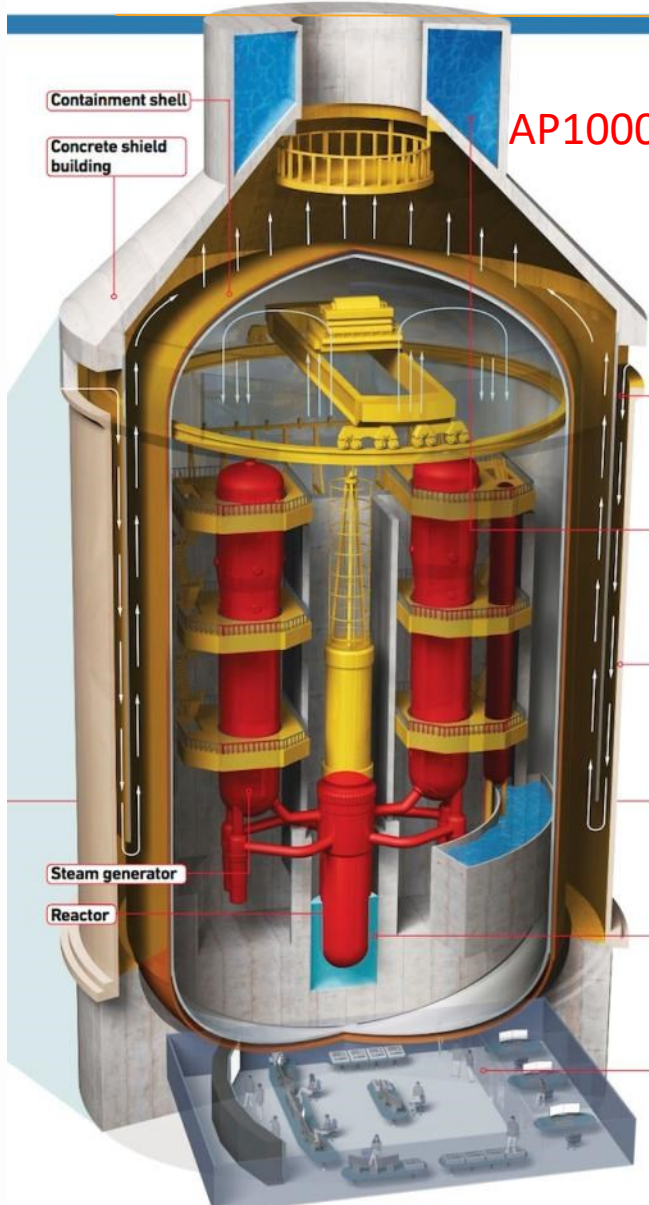
Ядерна енергія в Україні. Реактори. AP1000

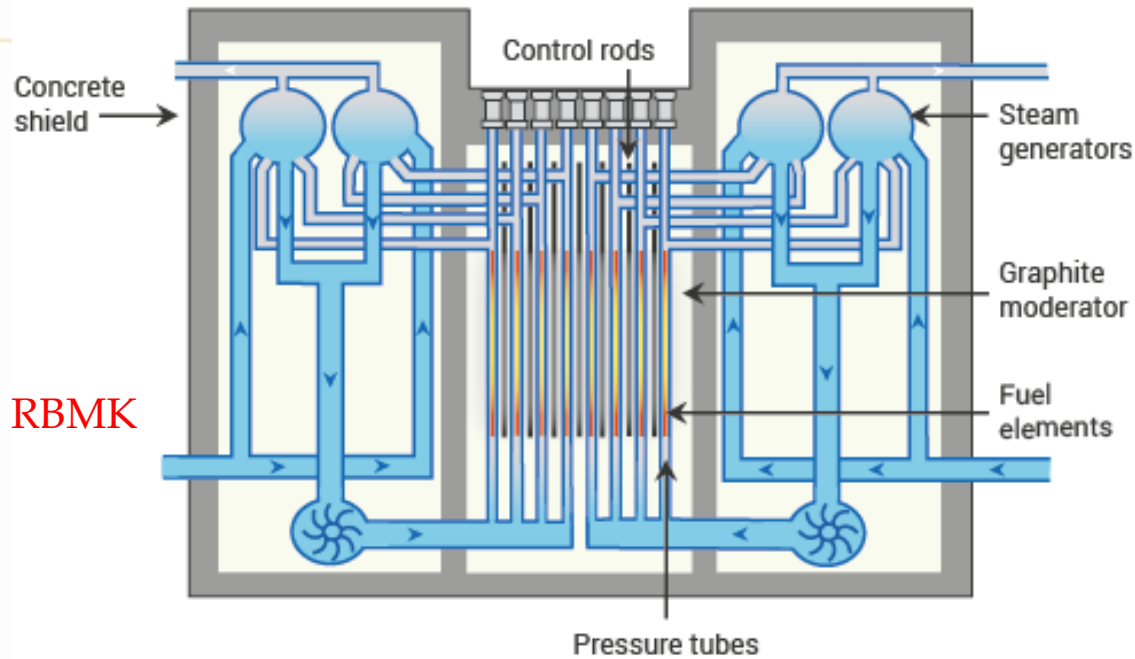
Розробник - Westinghouse Electric Company, США - енергетичний реактор з водяним охолодженням

AP1000 - це реактор з водою під тиском (PWR) з двома контурами охолодження

Проект AP1000 значно компактніший у використанні земельних ділянок, ніж більшість існуючих реакторів типу PWR, і використовує менше п'ятої частини бетону та арматури, ніж старі проекти. При проектуванні станцій використовувалась імовірна оцінка ризиків - максимальна частота пошкоджень активної зони $5,09 \times 10^{-7}$ на станцію на рік. Відпрацьоване паливо, вироблене на AP1000, може зберігатися протягом невизначеного часу у воді на майданчику станції. Витримане відпрацьоване паливо можна також зберігати в наземному сухому сховищі в бочках.

Енергетичні реактори всіх типів продовжують виробляти тепло від продуктів радіоактивного розпаду навіть після зупинки основної реакції, тому необхідно відводити це тепло, щоб уникнути розплавлення активної зони реактора. AP1000 використовує бак з водою, розташований над реактором. Коли активується система пасивного охолодження, вода самопливом надходить до верхньої частини реактора, де вона випаровується, відводячи тепло. Система використовує декілька клапанів, які повинні спрацювати протягом перших 30 хвилин. Це має статися, навіть якщо оператори реактора не вживатимуть жодних заходів. Електрична система, необхідна для запуску пасивних систем, не залежить від зовнішньої або дизельної енергії, а клапани не залежать від гідравлічної системи або системи стисненого повітря.





РБМК - це водоохолоджуваний реактор з індивідуальними паливними каналами, що використовує графіт як сповільнювач (легководний графітовий реактор або LWGR). Як і в реакторі з киплячою водою (BWR), вода кипить в паливних каналах (при тиску близько 6,9 МПа), а пара відокремлюється над ними в єдиному контурі. (був розроблений у 1964-66 роках і дуже відрізняється від сучасних реакторів).

Паровий коефіцієнт реактивності - це число, за допомогою якого можна оцінити, наскільки змінюється реактивність ядерного реактора при утворенні порожнеч (як правило, бульбашок пари) в сповільнювачі або теплоносії реактора.

Паровий коефіцієнт реактивності

Реактори, що охолоджуються киплячою водою, будуть містити пару в активній зоні. Оскільки вода є більш ефективним теплоносієм і більш ефективним поглиначем нейтронів, ніж пара, зміна частки парових бульбашок, або "порожнин", в теплоносії призведе до зміни реактивності активної зони.

Коли паровий коефіцієнт від'ємний, збільшення кількості пари призведе до зменшення реактивності.

У реакторах, де одна і та ж вода виконує функції сповільнювача і теплоносія, надлишкове утворення пари зменшує уповільнення кількості нейтронів, необхідне для підтримки ланцюгової ядерної реакції. У конструкціях реакторів, де сповільнювач і теплоносії виготовлені з різних матеріалів, надлишок пари зменшує охолодження реактора, але оскільки сповільнювач залишається неушкодженим, ланцюгова ядерна реакція продовжується.

У реакторах РБМК поглинання нейтронів відбувається охолоджуючою водою є важливим фактором, що впливає на експлуатаційні характеристики.

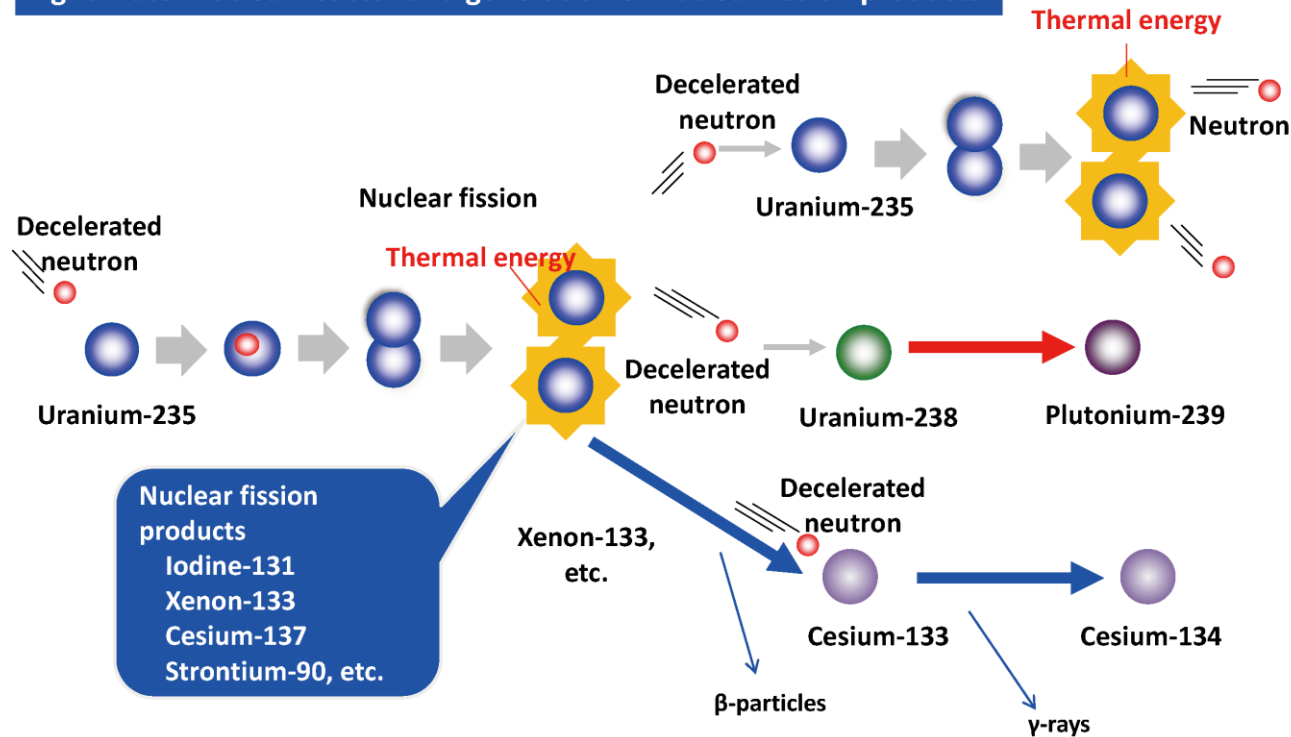
У таких випадках зменшення поглинання нейтронів в результаті виробництва пари і, як наслідок, поява додаткових вільних нейтронів, посилює ланцюгову реакцію. Це призводить до збільшення реактивності системи. Паровий коефіцієнт є лише одним з компонентів загального енергетичного коефіцієнта реактивності, але в реакторах РБМК він є домінуючим компонентом, що відображає високий ступінь залежності реактивності від вмісту пари в активній зоні.



Nuclear Disaster

Products in Nuclear Reactors

Light-water nuclear reactor and generation of nuclear fission products



Ядерний реактор з водним охолодженням на сьогоднішній день є найширше використовуваним типом реактора в усьому світі.

Бомбардування збагаченого уранового палива (уран-235: 3-5%; уран-238: 95-97%) нейтронами призводить до ядерного поділу.

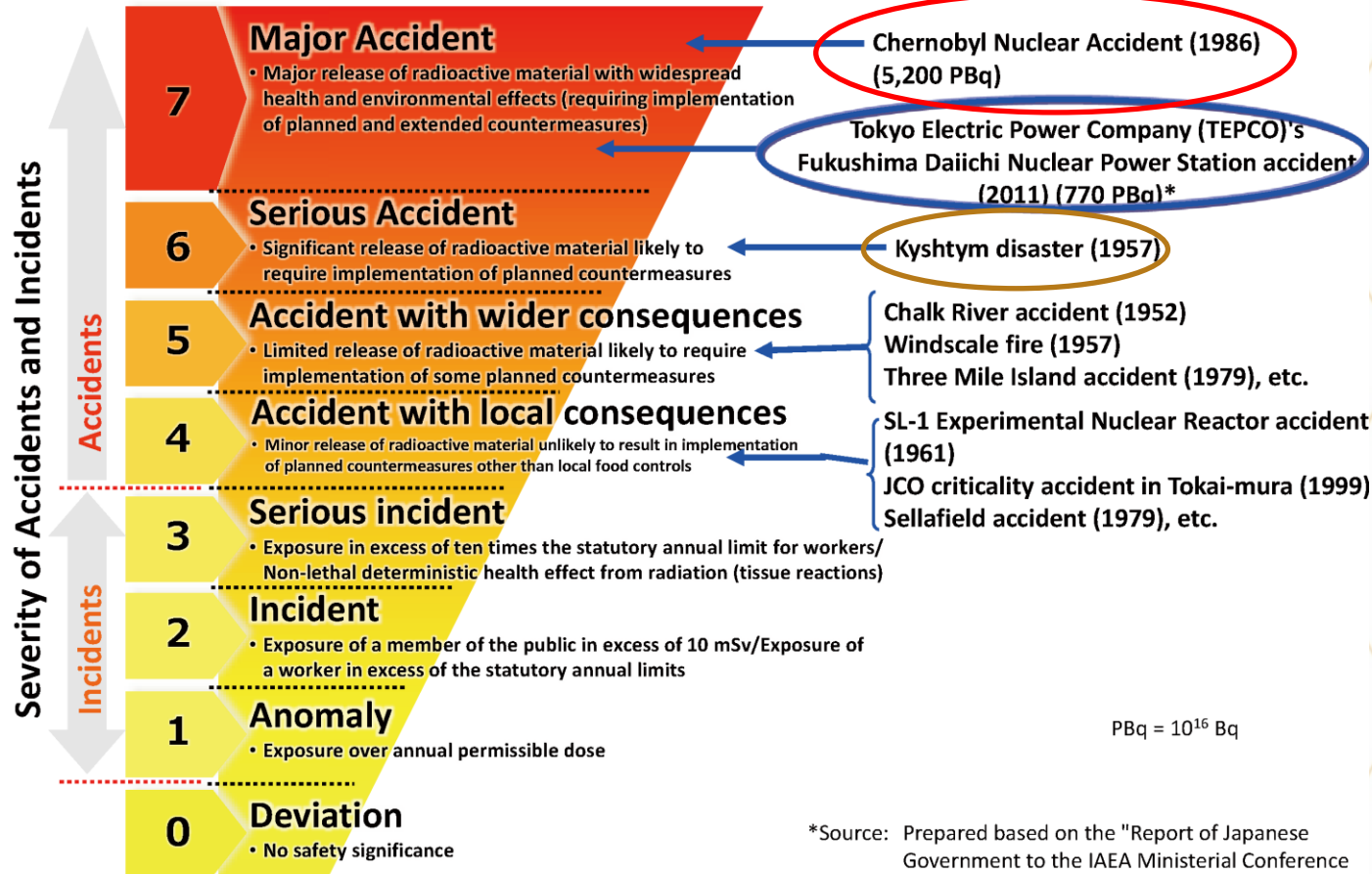
У цьому процесі утворюються радіоактивні продукти ядерного поділу, такі як йод-131, цезій-137 і стронцій-90. Коли уран-238 бомбардують нейтронами, утворюється плутоній-239.

Цезій-134 не утворюється безпосередньо з ядерного поділу урану-235. Через бета-розпад ксенон-133 та інші продукти ядерного поділу розпадаються на цезій-133, а цезій-133 потім перетворюється на цезій-134, оскільки сповільнені нейтрони потрапляють у пастку. Поки реактор працює належним чином, ці продукти залишаються в ядерних паливних стрижнях і не витікають з реактора.

Ядерні об'єкти обладнані різноманітними механізмами для запобігання витоку радіоактивних матеріалів, але якщо всі вони перестануть функціонувати належним чином, відбудеться витік радіоактивних речовин



Nuclear Disaster International Nuclear and Radiological Event Scale



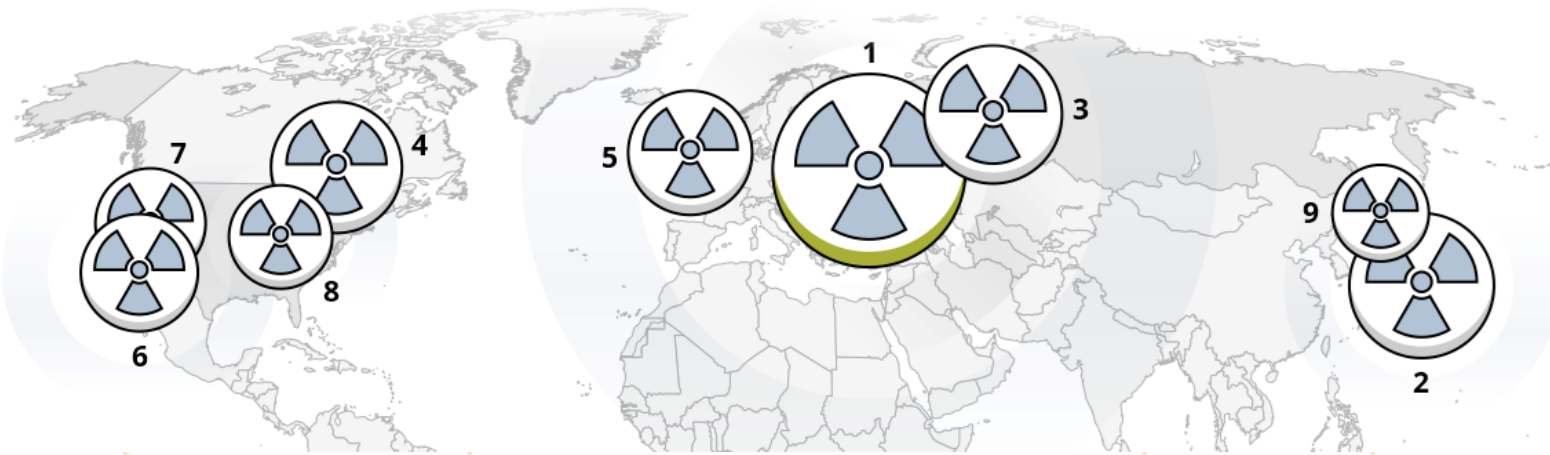
*Source: Prepared based on the "Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety" (June 2011)

Міжнародна шкала ядерних і радіологічних подій (INES) була створена МАГАТЕ (Міжнародним агентством з атомної енергії) та ОЕСР/АЯЕ (Організацією економічного співробітництва та розвитку/Агентством з ядерної енергії), і в 1992 році всім країнам було рекомендовано офіційно прийняти її.

Інциденти та аварії на ядерних об'єктах поділяються на сім категорій за ступенем тяжкості. Кожна країна визначає ступінь тяжкості інцидентів або аварій за цією шкалою і оголошує результати.

Аварії на Чорнобильській АЕС та на АЕС "Фукусіма-1" компанії ТЕРСО були попередньо віднесені до 7-го рівня, що свідчить про те, що це були найсерйозніші аварії через кількість викинутих радіоактивних матеріалів.





1 Chernobyl disaster ■ 7 Where: Ukraine, USSR When: April 26, 1986	2 Fukushima accident ■ 7 Where: Japan When: March 11, 2011	3 Kyshtym disaster ■ 6 Where: Russia, USSR When: September 29, 1957	4 Accident at Chalk River ■ 5 Where: Canada When: December 12, 1952	
5 Windscale fire ■ 5 Where: UK When: October 10, 1957	6 Leakage of radioactive gases at Santa Susana Field Laboratory ■ 5 Where: USA When: July 26, 1959	7 Release of radioactive iodine at the SL-1 ■ 5 Where: USA When: January 3, 1961	8 Three Mile Island accident ■ 5 Where: USA When: March 28, 1979	9 Radiation accident in the Chazhma Bay ■ 5 Where: Sea of Japan, USSR When: August 10, 1985

Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) визначає ядерну та радіаційну аварію як "подія, яка призвела до значних наслідків для людей, навколишнього середовища або об'єкта. Прикладами можуть бути смертельні наслідки для людей, великий викид радіоактивних речовин в навколишнє середовище, розплавлення активної зони реактора".



Nuclear Disaster		Radioactive Materials Derived from Nuclear Accidents				
	H-3 Tritium	Sr-90 Strontium-90	I-131 Iodine-131	Cs-134 Cesium-134	Cs-137 Cesium-137	Pu-239 Plutonium-239
Types of radiation	β	β	β, γ	β, γ	β, γ	α, γ
Biological half-life	10 days ^{*1 *2}	50 years ^{*3}	80 days ^{*2}	70-100 days ^{*4}	70-100 days ^{*3}	Liver: 20 years ^{*5}
Physical half-life	12.3 years	29 years	8 days	2.1 years	30 years	24,000 years
Effective half-life <small>(calculated from biological half-life and physical half-life)</small>	10 days	18 years	7 days	64-88 days	70-99 days	20 years
Organs and tissues where radioactive materials accumulate	Whole body	Bones	Thyroid	Whole body	Whole body	Liver and bones

Чотири типи радіоактивних матеріалів - йод-131, цезій-134, цезій-137 і стронцій-90 - викликають найбільше занепокоєння з точки зору здоров'я та навколишнього середовища.

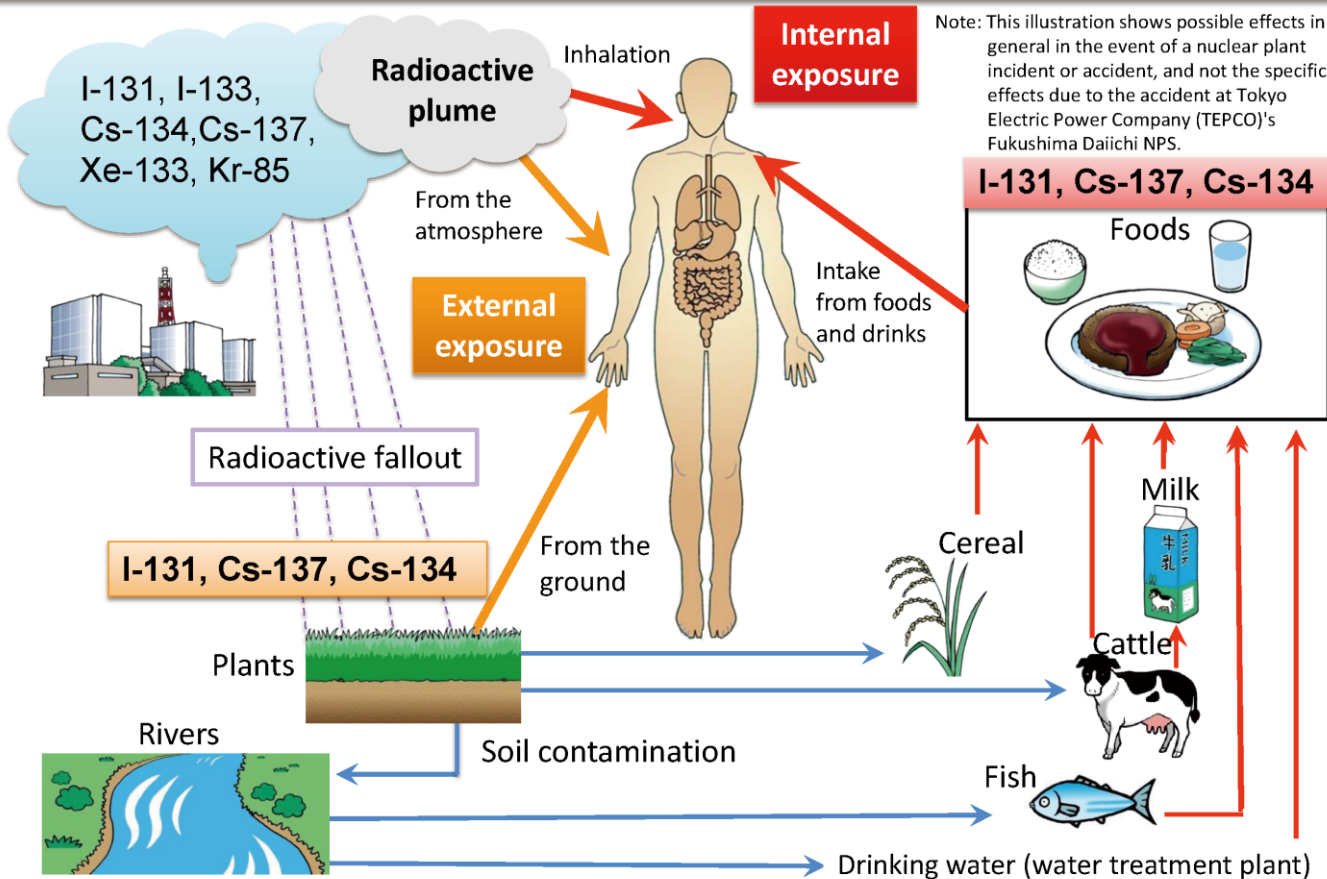
Йод-131 має малий період напіврозпаду - близько 8 днів, але коли він потрапляє в організм, 10-30% його накопичується в щитовидній залозі. Якщо це станеться, щитовидна залоза продовжуватиме деякий час зазнавати локального опромінення β -частинками та γ -променями.

Цезій-134 і Цезій-137 є основними причинами забруднення внаслідок аварій на атомних електростанціях. Цезій-137 має великий період напіврозпаду - 30 років і продовжує забруднювати навколишнє середовище протягом тривалого часу. Оскільки радіоактивний цезій має подібні хімічні властивості з калієм, він буде розподілятися по організму, як і калій. Біологічний період напіврозпаду цезію та йоду залежить від віку людини, і, як відомо, він стає тим коротшим, чим молодша людина.

Стронцій-90 має великий період напіврозпаду, і, потрапляючи в організм, він накопичується в кістках, оскільки за своїми хімічними властивостями подібний до кальцію. Оскільки він не випромінює γ -промені, виявити, де і скільки його є в організмі, не так просто, як у випадку з цезієм-134 і цезієм-137. При аварії на АЕС стронцій-90 також утворюється в результаті ядерного поділу, хоча і в меншій кількості, ніж цезій-134 і цезій-137.



Effects of Reactor Accidents

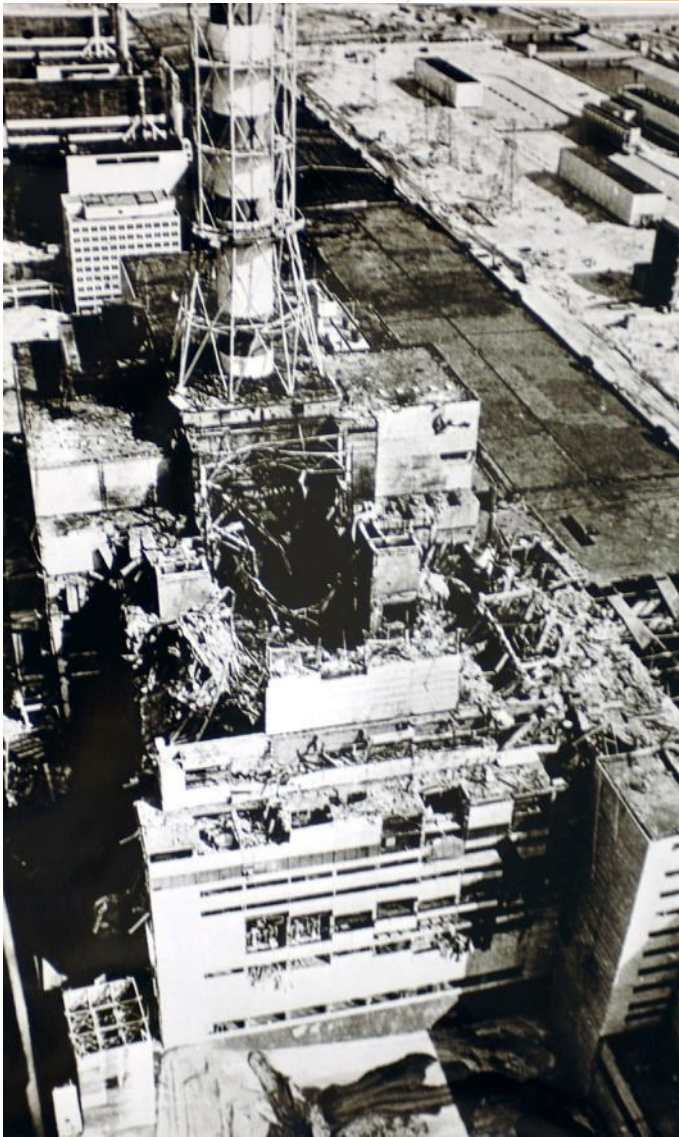


Якщо на ядерній установці трапляється аварійна ситуація і відбувається витік радіоактивного газу, він потрапляє в атмосферу у стані, який називається "шлейф".

Шлейфи містять радіоактивні інертні гази та аерозолі (мікрокраплі та частинки рідини), такі як радіоактивний йод та радіоактивний цезій. Коли шлейф проходить у повітрі, то люди, що знаходяться під ним, піддаються зовнішньому опроміненню від радіоактивних матеріалів, що містяться в ньому. Крім того, люди, які вдихають радіоактивні матеріали, що містяться в шлейфі, піддаються внутрішньому опроміненню. Радіоактивні інертні гази не осідають на землю, і навіть якщо вони потрапляють в організм людини при вдиханні, вони не залишаються в ньому. Аерозолі, такі як радіоактивний йод і радіоактивний цезій, поступово опускаються вниз під час проходження шлейфу і осідають на поверхню землі та рослин.

Зовнішнє опромінення від осаджених радіоактивних матеріалів може відбутися навіть після того, як шлейф пройшов, а внутрішнє опромінення може також відбутися, якщо хтось споживає забруднену питну воду або продукти харчування.





На момент аварії на Чорнобильській АЕС паровий коефіцієнт реактивності був настільки додатнім, що переважав інші складові коефіцієнта потужності, і сам коефіцієнт потужності став додатнім. Коли потужність почала зростати, було вироблено більше пари, що, в свою чергу, призвело до збільшення потужності. Додаткове тепло, отримане в результаті збільшення потужності, підвищило температуру в контурі охолодження.

Більше пари означає менше охолодження і менше поглинання нейтронів, що призвело до швидкого збільшення потужності до 100-кратної потужності реактора.

Справжню кількість жертв Чорнобильської катастрофи важко оцінити через довготривалі наслідки радіоактивного забруднення для здоров'я людей.

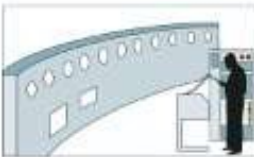
Офіційна кількість загиблих, безпосередньо пов'язаних з Чорнобилем, визнана міжнародною спільнотою, становить лише 31 особу.



Chornobyl . Timeline of a disaster

1 April 25, 1986

A safety experiment is carried out while Reactor No. 4 is shut down for routine maintenance.

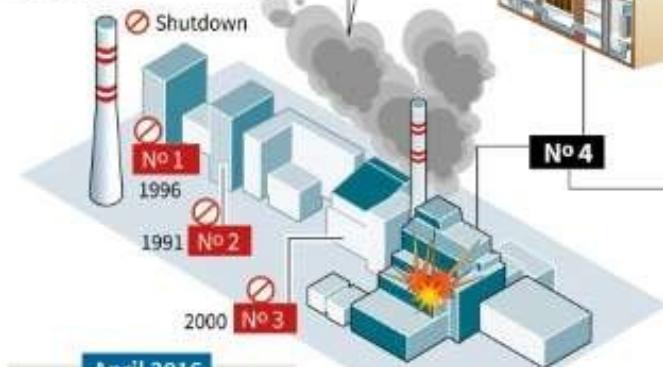


2 26 April, 1986

1:23 am: a sudden drop in power triggers a chain of events causing the reactor to overheat.

Reactor no.4 explodes. A radioactive cloud of smoke shoots 1 km into the air and, pushed by the winds, spreads across northern Europe.

Reactors



April 2016

The new sarcophagus is still not in place. The project is due to be completed in 2017

© AFP

Sources: www.world-nuclear-org, UNSCEAR, OMS

3 April 26 - May 5, 1986

Thousands of tonnes of sand, clay and lead are dropped on to the reactor to quench the fire.

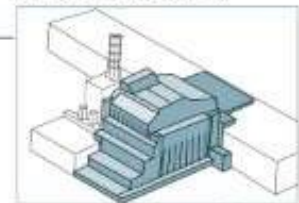


4 Spring and summer 1986

116,000 people are evacuated from immediate area. In later years 230,000 people relocated.

5 November 1986

"Temporary" steel-concrete cover is built over destroyed reactor to contain its 200 tonnes of molten nuclear fuel.



6 1986 - 1990

Hundreds of thousands of clean-up workers attempt to isolate and decontaminate the danger zone



25 квітня 1986 року, перша година ночі.

Оператори Чорнобильської АЕС починають зменшувати потужність на реакторі №4 для проведення тесту безпеки, який вони приурочили до планової зупинки для технічного обслуговування. Випробування мало визначити, чи зможуть турбіни станції, які все ще обертаються, виробити достатньо електроенергії, щоб підтримувати роботу насосів охолоджувача протягом короткого проміжку часу до того, як увімкнуться аварійні генератори.

25 квітня 1986 року, 14:00.

Аварійну систему охолодження активної зони реактора №4 відключають, щоб вона не заважала проведенню випробування.

25 квітня 1986 року, 23:10.

Оператори отримують дозвіл на випробування та зупинку. Менш досвідчена нічна зміна так і не отримала належних інструкцій про те, як проводити випробування.

26 квітня 1986 року, 12:28.

Потужність падає набагато нижче рівня, на якому реактор вважається стабільним. Оператори реагують на це, виймаючи більшість регулюючих стрижнів, порушуючи правила безпеки станції, але їм все одно не вдається підняти потужність.

26 квітня 1986 року, 1 година ночі.

Потужність стабілізується, хоча й на нижчому за бажаний рівні, і керівництво станції наказує продовжити випробування. Автоматичне аварійне відключення вимкнено.

26 квітня 1986 року, 1:23:04 ранку.

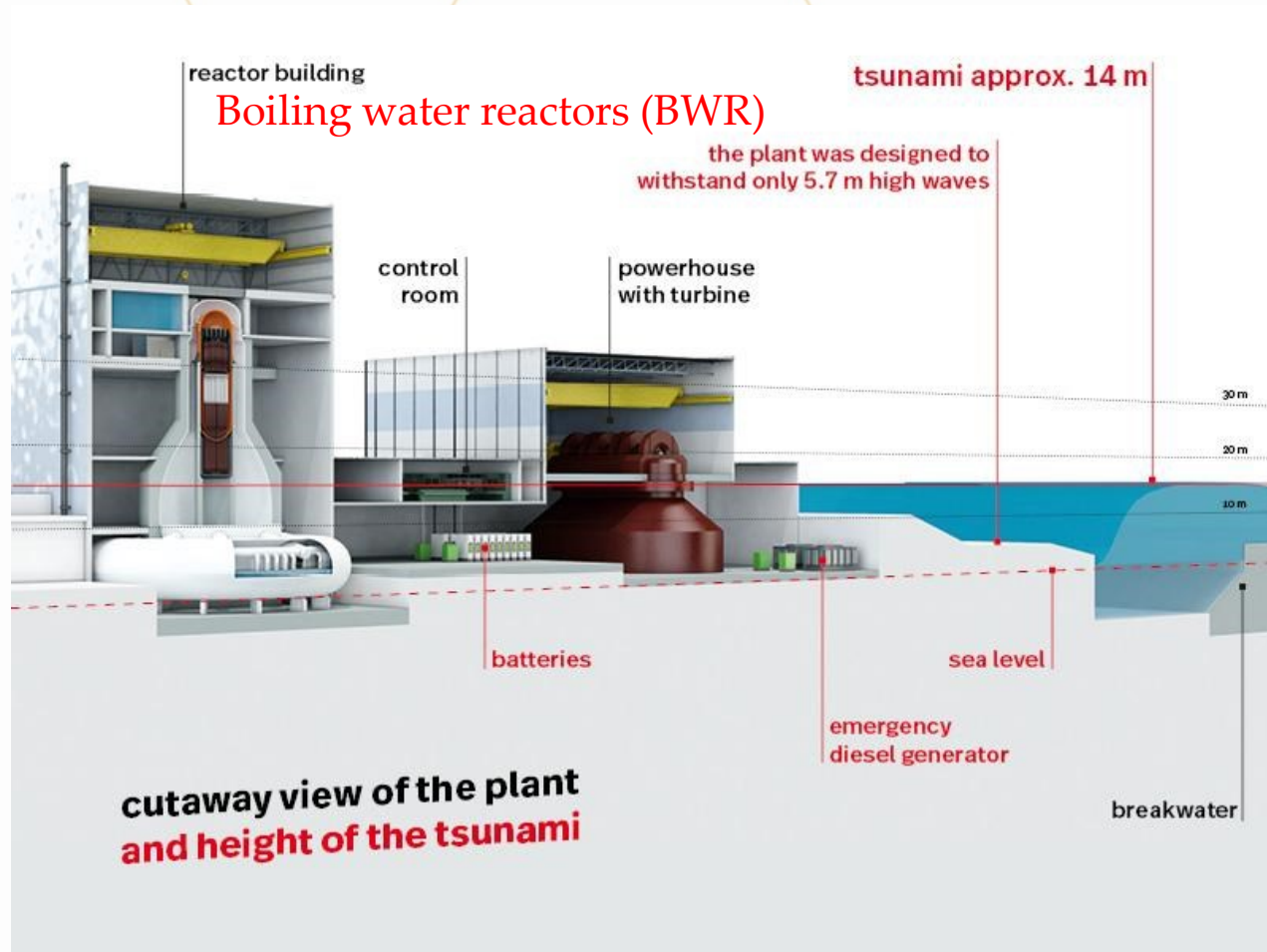
Випробування офіційно розпочалося, і стався несподіваний стрибок напруги.

26 квітня 1986, 1:23:40.

Оператор натискає кнопку аварійного вимкнення, але стрижні управління заклинює, коли вони входять в активну зону.

26 квітня 1986 року, 1:23:58.

Перший вибух, за яким незабаром буде щонайменше ще один, який зриває 1000-тонний дах з реактора і вистрілює вогняною кулею в нічне небо.



Аварія на АЕС "Фукусіма" - велика ядерна аварія на атомній електростанції "Фукусіма-1" в Японії, що сталася 11 березня 2011 року. Причиною аварії стали землетрус і цунамі в регіоні Тохоку в 2011 році, які призвели до виходу з ладу електромережі і пошкодили майже всі резервні джерела енергії електростанції. Подальша нездатність забезпечити достатнє охолодження реакторів після зупинки поставила під загрозу утримання і призвела до викиду радіоактивних забруднювачів у навколишнє середовище. Не було задокументовано жодних негативних наслідків для здоров'я мешканців Фукусіми або працівників електростанції, які можна було б безпосередньо пов'язати з радіаційним опроміненням внаслідок аварії. Після аварії щонайменше 164 000 мешканців прилеглих територій були постійно або тимчасово переміщені. Ця реакція призвела до щонайменше 51 летального випадку, [причому більше пов'язано з подальшим стресом або страхом перед радіологічною небезпекою...].





11 березня 2011 року

О 14:46 біля острова Хонсю стався землетрус магнітудою 9,0 балів. Реактори 1,2 і 3 на АЕС Фукусіма автоматично зупинилися, реактори 4,5,6 на той час вже були відключені для технічного обслуговування. Спочатку станція охолоджувалася резервними генераторами. Годиною пізніше сталося 14-метрове цунамі, яке переповнило 6-метрову морську стіну, затопило станцію і вивело з ладу всі генератори. Більша частина аварійної системи охолодження активної зони виходить з ладу.

12 березня 2011 року

Аварійна резервна батарея для реактора 3 розряджається, і паливні стрижні оголюються. У повітря виділяється пара. Оскільки ситуація на 3 реакторі погіршується, зона евакуації розширюється - спочатку до 10 км, потім до 20 км

13 березня 2011 року

Пошкодження активної зони починається на 3-му блоці, 2-й блок вважається стабільним.

14 березня 2011 року

Потужний вибух у будівлі реактора №3 пошкоджує систему охолодження реактора №2, що призводить до пошкодження активної зони в цьому блоці.

15 березня 2011 року

Вибух завдає серйозних пошкоджень реактору 4. Ще один вибух стався на третьому енергоблоці. Починається пожежа на 4-му енергоблоці. Радіація біля реактора 3 вимірюється на рівні 0,4 Зв/год.

17 березня 2011 року

Будівельники починають підключати зовнішнє джерело живлення до всіх 6 енергоблоків. Гелікоптери прилітають, щоб скинути воду на басейни витримки відпрацьованого ядерного палива на енергоблоках 3 і 4.

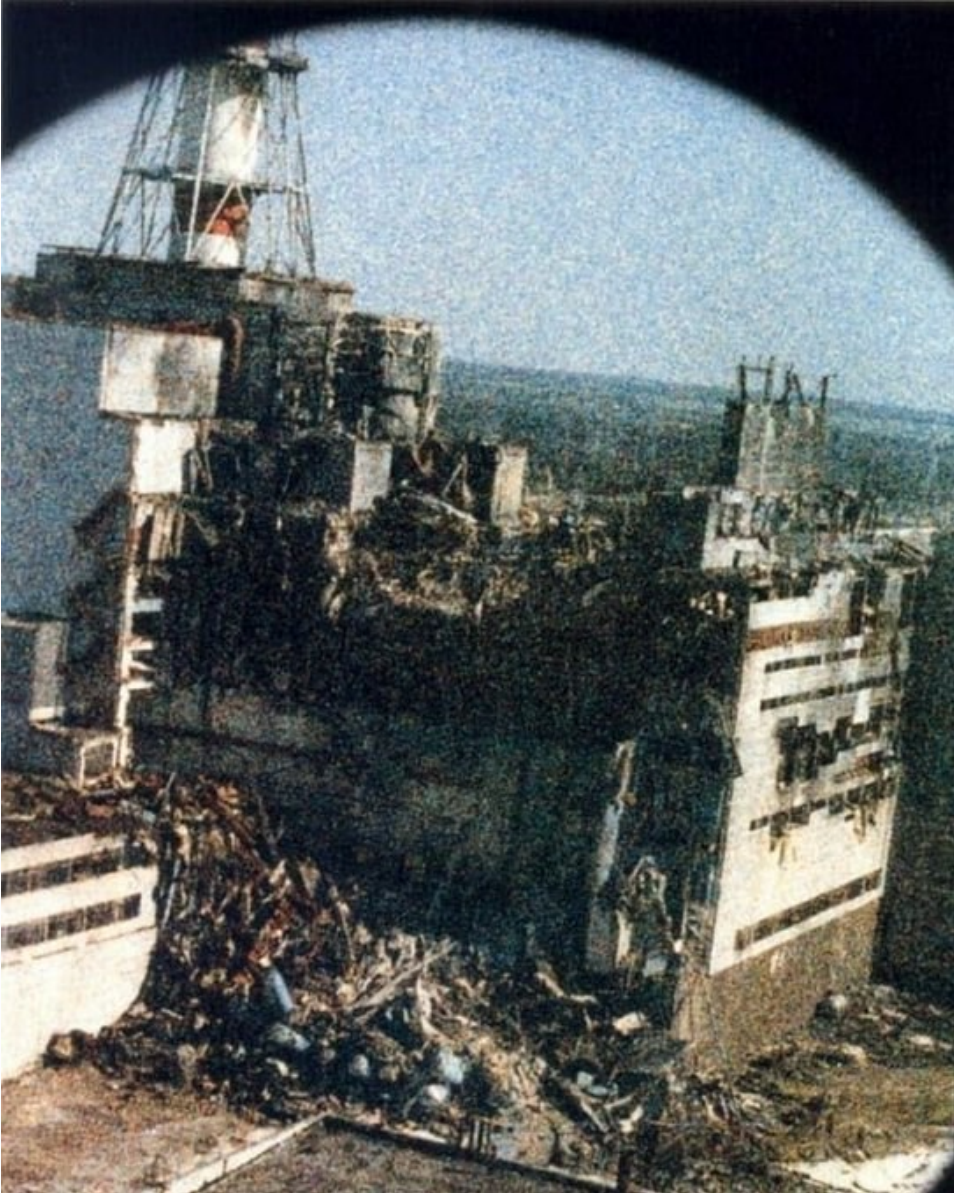
18 березня 2011 року

30 пожежних машин Токійської пожежної компанії починають розпилювати воду на уражені реактори.

20 березня 2011 року

Успішно підключено живлення до енергоблоку №2. Відремонтовано генератор, що забезпечує живлення 5-го і 6-го енергоблоків, що дозволило перевести їх обидва в режим холодної зупинки.





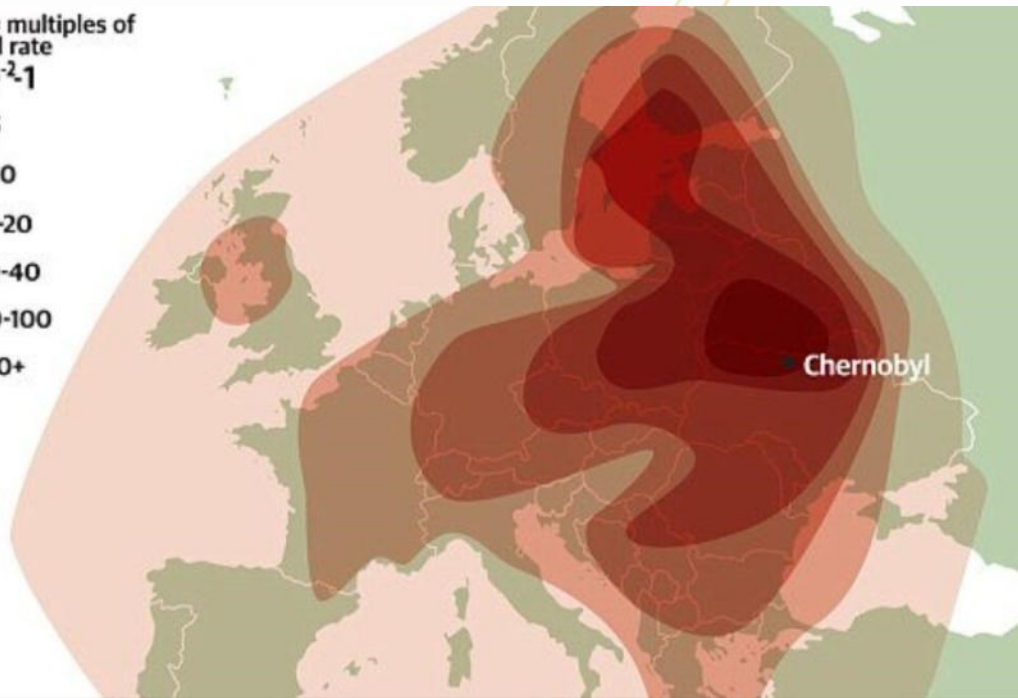
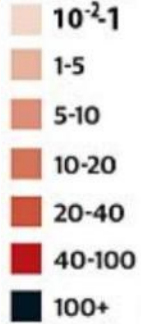
Це перше зображення Чорнобиля, зроблене через 14 годин після вибуху 26 квітня 1986 року. Фото було зроблено з гелікоптера, який оцінював рівень радіації над зоною катастрофи. **Зображення є зернистим через інтенсивну радіацію в повітрі, яка почала пошкоджувати плівку фотоапарата одразу після експозиції.**

Ігор Костін, фотограф, виявив, що радіація вплинула на його пристрій приблизно після 20 фотографій. Коли він обробив свої плівки, тільки зображення вище було придатним для використання. Всі інші фотографії, що постраждали від високого рівня радіації, вийшли повністю чорними. Його знімки допомогли розповісти світові про катастрофу. Незважаючи на близькість до місця аварії, Костін не отримав смертельної дози радіації.

Він загинув в автокатастрофі у 2015 році, коли йому було 78 років...



Dose = multiples of normal rate

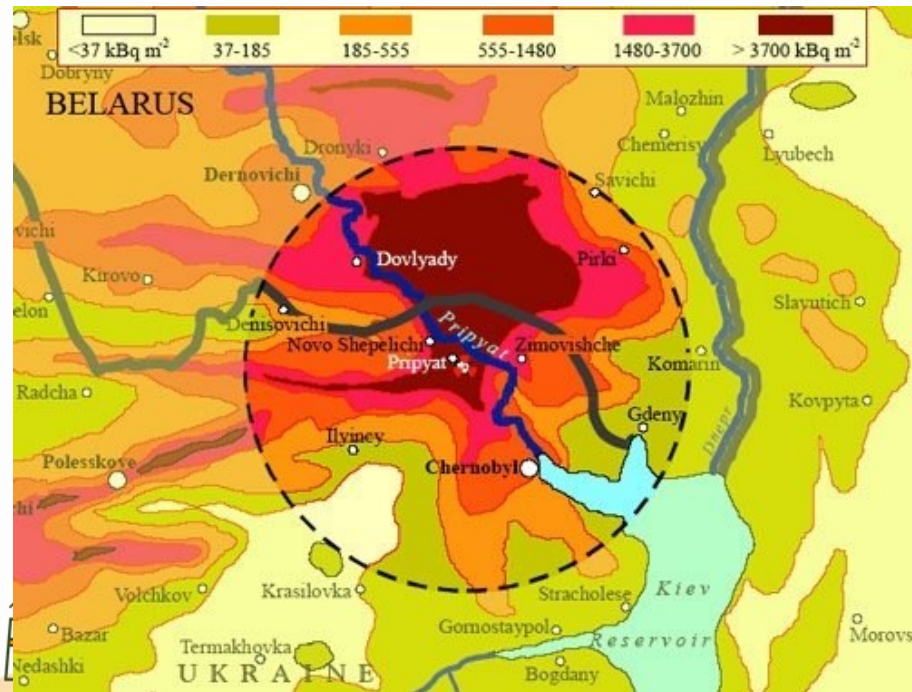


Чорнобиль та рівень радіаційного забруднення

Середня ефективна доза опромінення осіб, які найбільше постраждали внаслідок аварії, становить близько **120 мЗв** для 530 000 працівників аварійно-відновлювальних робіт, **30 мЗв** для 115 000 евакуйованих осіб та **9 мЗв** протягом перших двох десятиліть після аварії для тих, хто продовжував проживати на забруднених територіях.

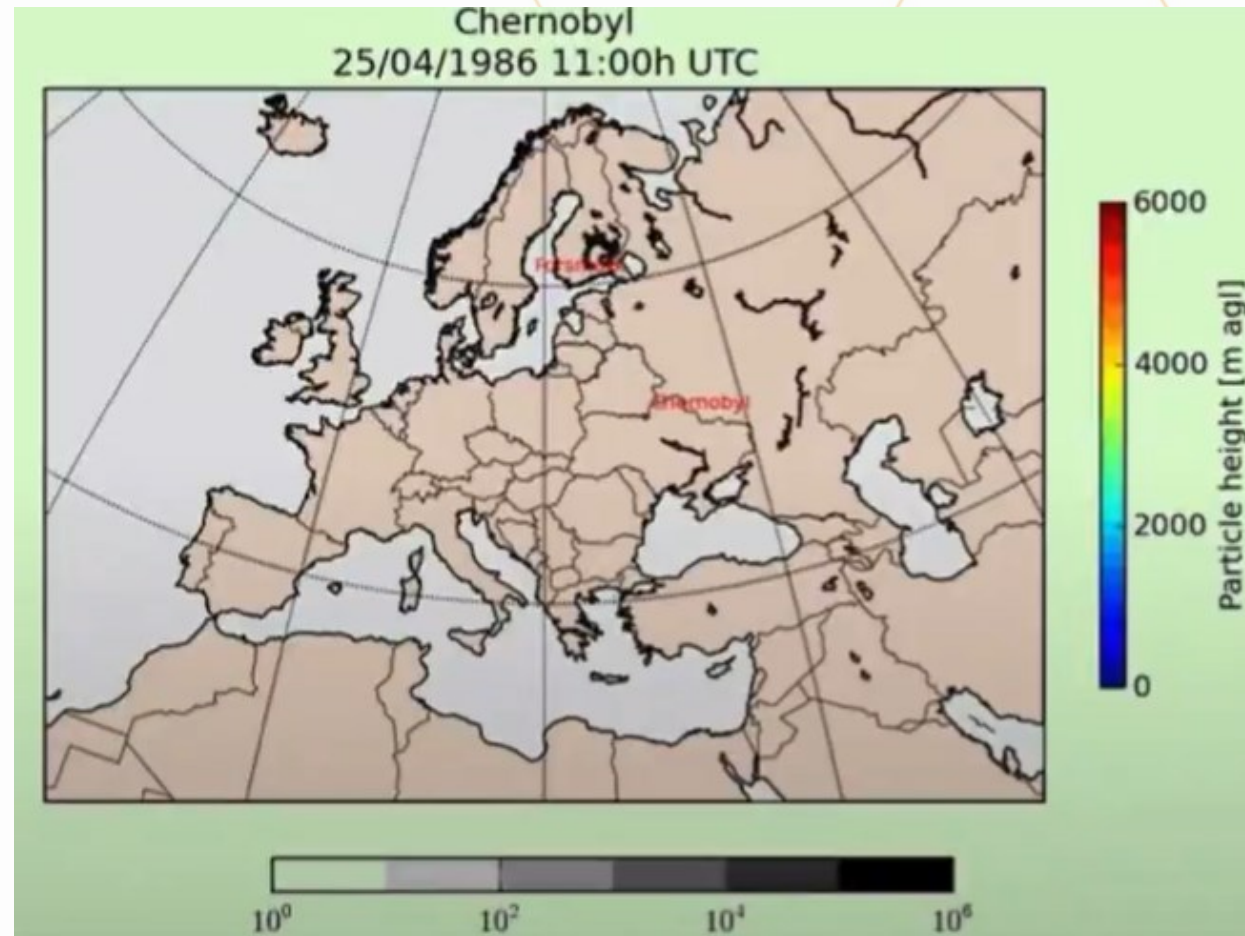
АЛЕ

типова доза від одного сканування комп'ютерної томографії становить **9 мЗв**

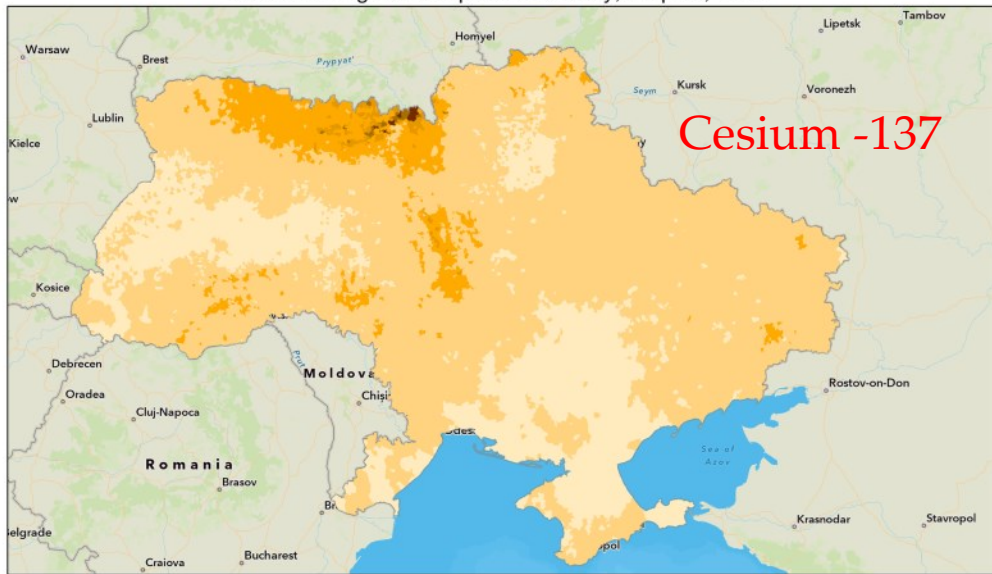


Радіонукліди, що були викинуті з реактора і спричинили опромінення людей, - це переважно йод-131, цезій-134 і цезій-137. Йод-131 має малий радіоактивний період піврозпаду (вісім днів), але він може відносно швидко потрапляти в організм людини з повітря та через споживання забрудненого молока і листових овочів. Йод локалізується в щитовидній залозі.

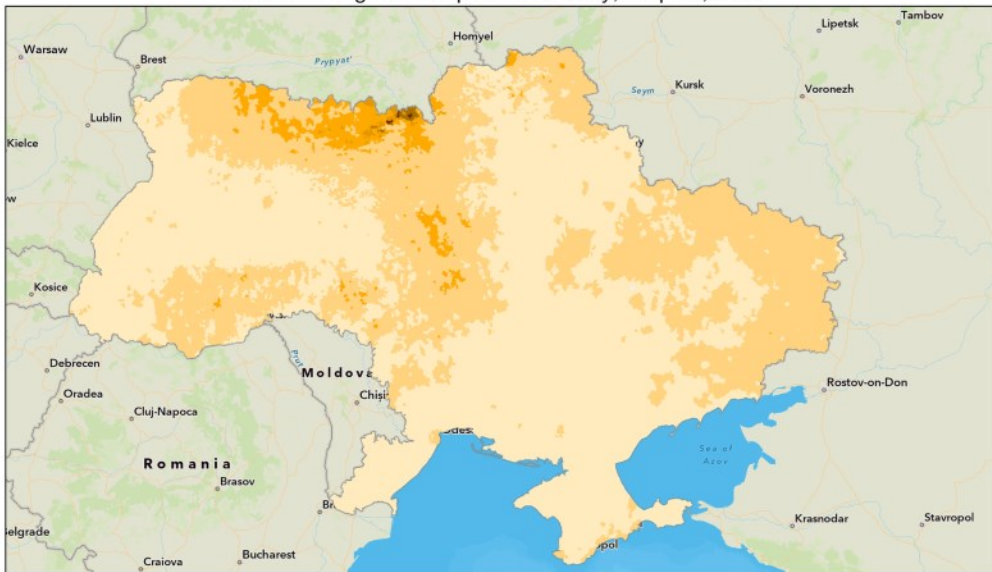
<https://twitter.com/i/status/1769061532732731436>



Cesium-137 ground deposition density, kBq/m², 1986



Cesium-137 ground deposition density, kBq/m², 2020



5/1/2023, 3:19:06 PM
Cesium-137, kBq/m², 2020 (estimated)

0.2 - 3.69	37 - 184.99	1480 - 6041.06
3.7 - 36.99	185 - 554.99	Oblasts
	555 - 1479.99	

1:9,244,649
0 50 100 200 mi
0 80 160 320 km
HURI, Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS

Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS | HURI

Чорнобиль спричинив радіаційне забруднення. Цезій-137

Період напіврозпаду: 30,17 років

Режим розпаду: Бета- та гамма-випромінювання

Cs-137 є одним з побічних продуктів процесів ядерного поділу в ядерних реакторах та випробувань ядерної зброї. Невеликі кількості Cs-137 можна знайти в навколишньому середовищі внаслідок випробувань ядерної зброї, що відбувалися в 1950-х і 1960-х роках, а також внаслідок аварій на ядерних реакторах, таких як аварія на Чорнобильській електростанції в 1986 році, в результаті якої Cs-137 потрапив до багатьох країн Європи.

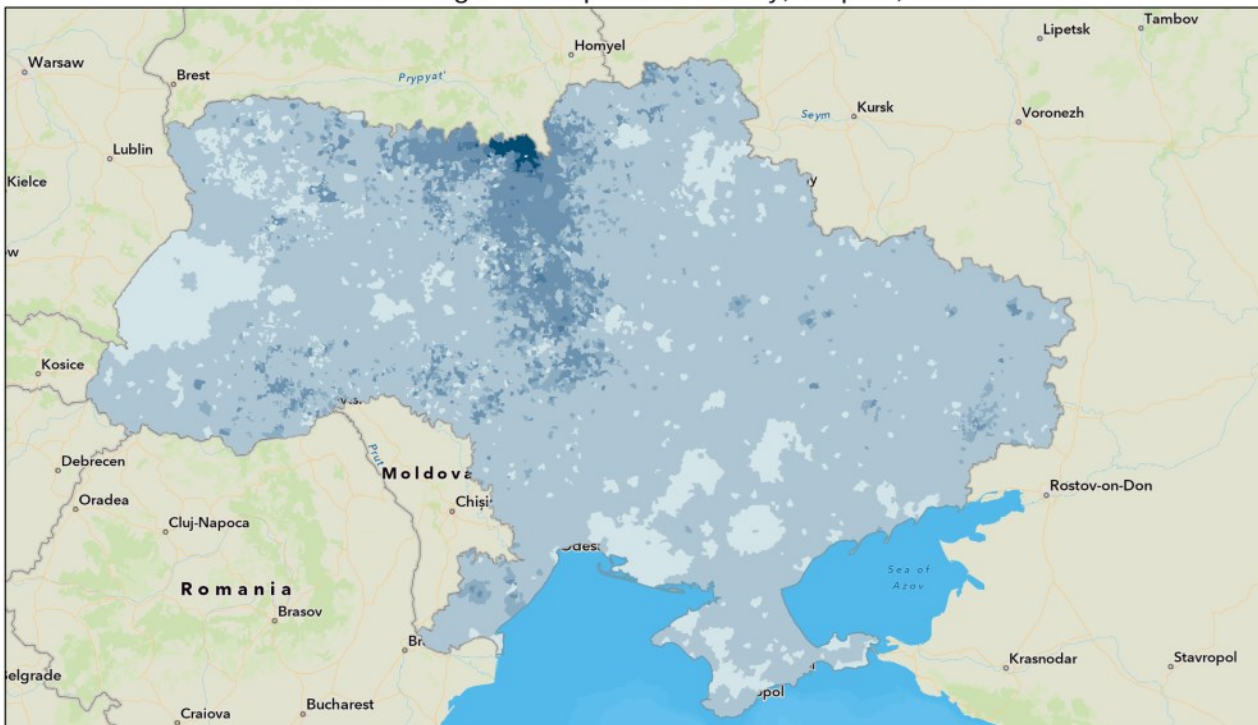
Опромінення Cs-137 може збільшити ризик розвитку раку через наявність високоенергетичного гамма-випромінювання.

Внутрішнє опромінення Cs-137 при прийомі всередину або вдиханні дозволяє радіоактивному матеріалу розподілятися в м'яких тканинах, особливо в м'язовій тканині, що підвищує ризик виникнення раку.



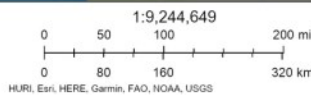
Чорнобиль спричинив радіаційне забруднення. Стронцій-90

Strontium-90 ground deposition density, kBq/m², 1986



5/1/2023, 3:22:47 PM

Strontium-90, kBq/m², 1986 (measured)



Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS | HURI |

Період напіврозпаду: 29,1 років

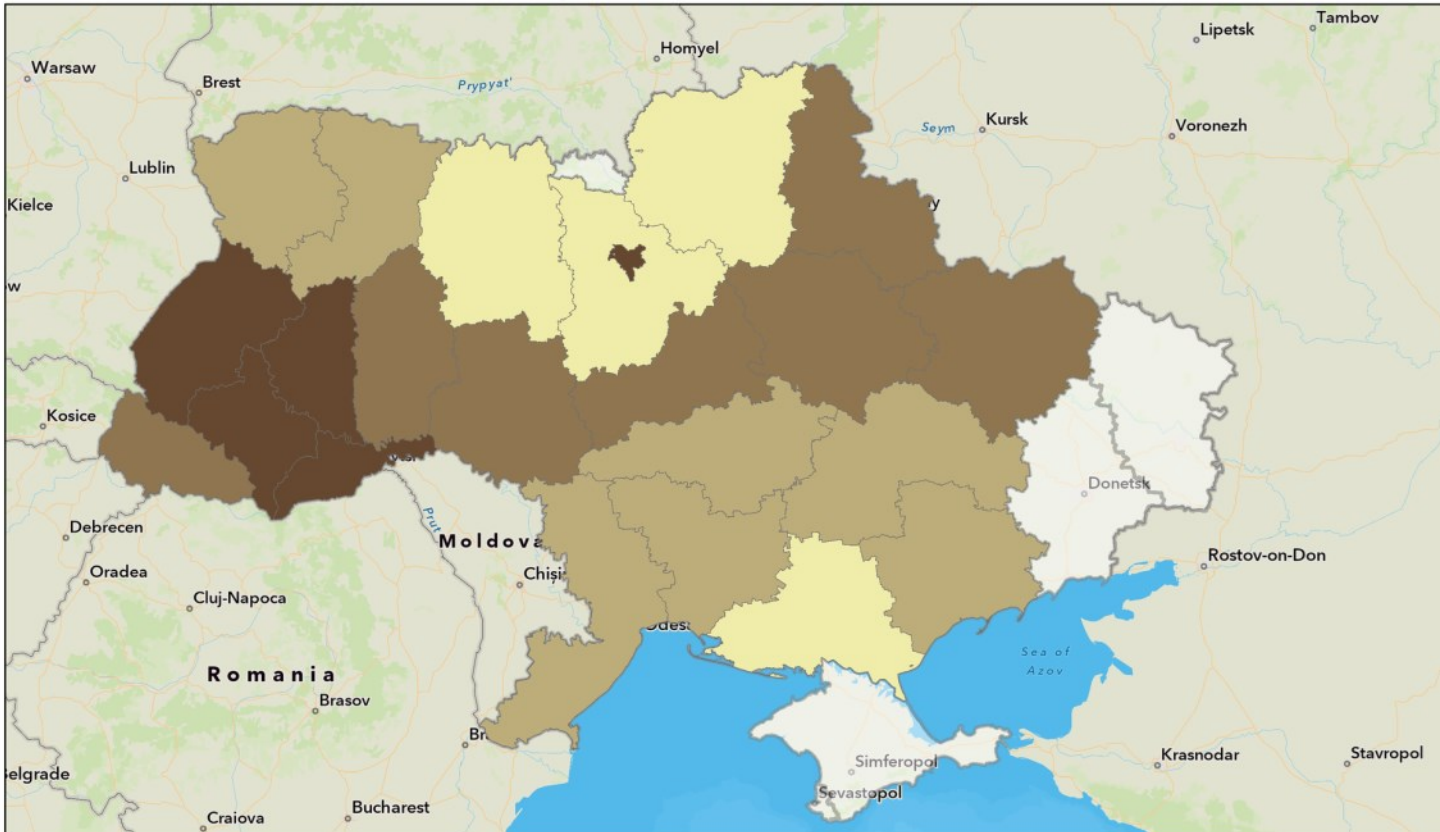
Режим розпаду: Бета-випромінювання

Sr-90 можна вдихати, але найбільшу небезпеку для здоров'я становить потрапляння в організм з їжею та водою. Потрапляючи в організм, Sr-90 діє як кальцій і легко вбудовується в кістки і зуби, де може викликати рак кісток, кісткового мозку і м'яких тканин навколо кісток.



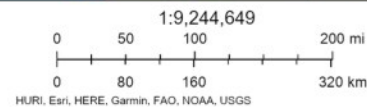
Чорнобиль спричинив радіаційне забруднення

Life expectancy at birth, 2019, male



5/1/2023, 3:04:49 PM

Life expectancy at birth, 2019, male



Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS | HURI |

3,8-4,0% усіх смертей на забруднених територіях України з 1990 по 2004 роки були спричинені Чорнобильською катастрофою. Відсутність доказів підвищення смертності в інших постраждалих країнах не є доказом відсутності впливу радіоактивних опадів. З 1990 року смертність серед ліквідаторів перевищувала рівень смертності у відповідних групах населення.

Від 112 000 до 125 000 ліквідаторів померли до 2005 року - тобто близько 15% з 830 000 членів команд з ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС.

Розрахунки показують, що Чорнобильська катастрофа вже забрала життя кількох сотень тисяч людей з кількох мільйонного населення, якому не пощастило проживати на територіях, що зазнали радіоактивного забруднення.



Nuclear Disaster

Comparison of Estimated Amounts of Released Radionuclides between the Chernobyl NPS Accident and the TEPCO's Fukushima Daiichi NPS Accidents

Nuclides	Half-life ^a	Boiling point ^b °C	Melting point ^c °C	Release into the environment: PBq [*]		TEPCO's Fukushima Daiichi NPS / Chernobyl NPS
				Chernobyl NPS ^d	TEPCO's Fukushima Daiichi NPS ^e	
Xenon (Xe)-133	5 days	-108	-112	6,500	11,000	1.69
Iodine (I)-131	8 days	184	114	~1,760	160	0.09
Cesium (Cs)-134	2 years	678	28	~47	18	0.38
Cesium (Cs)-137	30 years	678	28	~85	15	0.18
Strontium (Sr)-90	29 years	1,380	769	~10	0.14	0.01
Plutonium (Pu)-238	88 years	3,235	640	1.5×10^{-2}	1.9×10^{-5}	0.0012
Plutonium (Pu)-239	24,100 years	3,235	640	1.3×10^{-2}	3.2×10^{-6}	0.00024
Plutonium (Pu)-240	6,540 years	3,235	640	1.8×10^{-2}	3.2×10^{-6}	0.00018

Ratio of radionuclides accumulated in the reactor core at the time of the accidents that were released into the environment

Nuclides	Chernobyl NPS ^f	TEPCO's Fukushima Daiichi NPS ^g
Xenon (Xe)-133	Nearly 100%	Approx. 60%
Iodine (I)-131	Approx. 50%	Approx. 2-8%
Cesium (Cs)-137	Approx. 30%	Approx. 1-3%

*PBq equals 10^{15} Bq.

Sources: a: ICRP Publication 72 (1996); b and c: Rikagaku Jiten 5th edition (1998); d: UNSCEAR 2008 Report, Scientific Annexes C, D and E; e: Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety (June 2011); f: UNSCEAR 2000 Report, ANNEX J; g: UNSCEAR 2013 Report, ANNEX A


Цезій має температуру кипіння 678°C і тому перебуває в газоподібному стані, коли ядерне паливо знаходиться в розплавленому стані (його температура плавлення становить 2850°C). Коли цезій у газоподібному стані викидається в атмосферу, він переходить у рідкий стан, коли температура опускається нижче температури його кипіння, і далі перетворюється на тверді частинки при температурі нижче температури його плавлення 28°C . Таким чином, цезій перебуває в атмосфері переважно у вигляді твердих частинок і розноситься вітром на значні території. Приблизно так радіоактивний цезій поширювався на віддалені території під час аварії на Фукусімі.

Вважається, що більший викид цезію під час аварії на Чорнобильській АЕС був частково зумовлений тим, що активна зона вибухнула і зазнала прямого впливу атмосфери. На противагу цьому, відносно невелика кількість радіоактивних матеріалів була викинута з Фукусіми, оскільки значного руйнування захисного контейнера ледве вдалося уникнути, і це, як вважається, зменшило викиди радіоактивних матеріалів.



Effects on Human Body

Classification of Radiation Effects

		Incubation period	e.g.	Mechanism of how radiation effects appear
Categories of effects	Physical effects	Within several weeks = Acute effects (early effects)	Acute radiation syndromes* ¹ Acute skin disease	Deterministic effects (tissue reactions) caused by cell deaths or cell degeneration * ² 
		After the lapse of several months = Late effects	Abnormal fetal development (malformation)	
	Opacity of the lens			
	Heritable effects	Hereditary disorders		

*1: Major symptoms are vomiting within several hours after exposure, diarrhea continuing for several days to several weeks, decrease of the number of blood cells, bleeding, hair loss, transient male sterility, etc.

*2: Deterministic effects do not appear unless having been exposed to radiation exceeding a certain dose level.

Радіаційні ефекти поділяються на фізичні ефекти, що проявляються у людини, яка зазнала опромінення, та спадкові ефекти, що проявляються у її дітей чи онуків.

Радіаційні ефекти також можна класифікувати залежно від того, скільки часу пройшло від моменту опромінення до появи симптомів. Тобто, існують **гострі ефекти** (ранні ефекти), які проявляються відносно рано після опромінення, і **пізні ефекти**, які проявляються через кілька місяців.

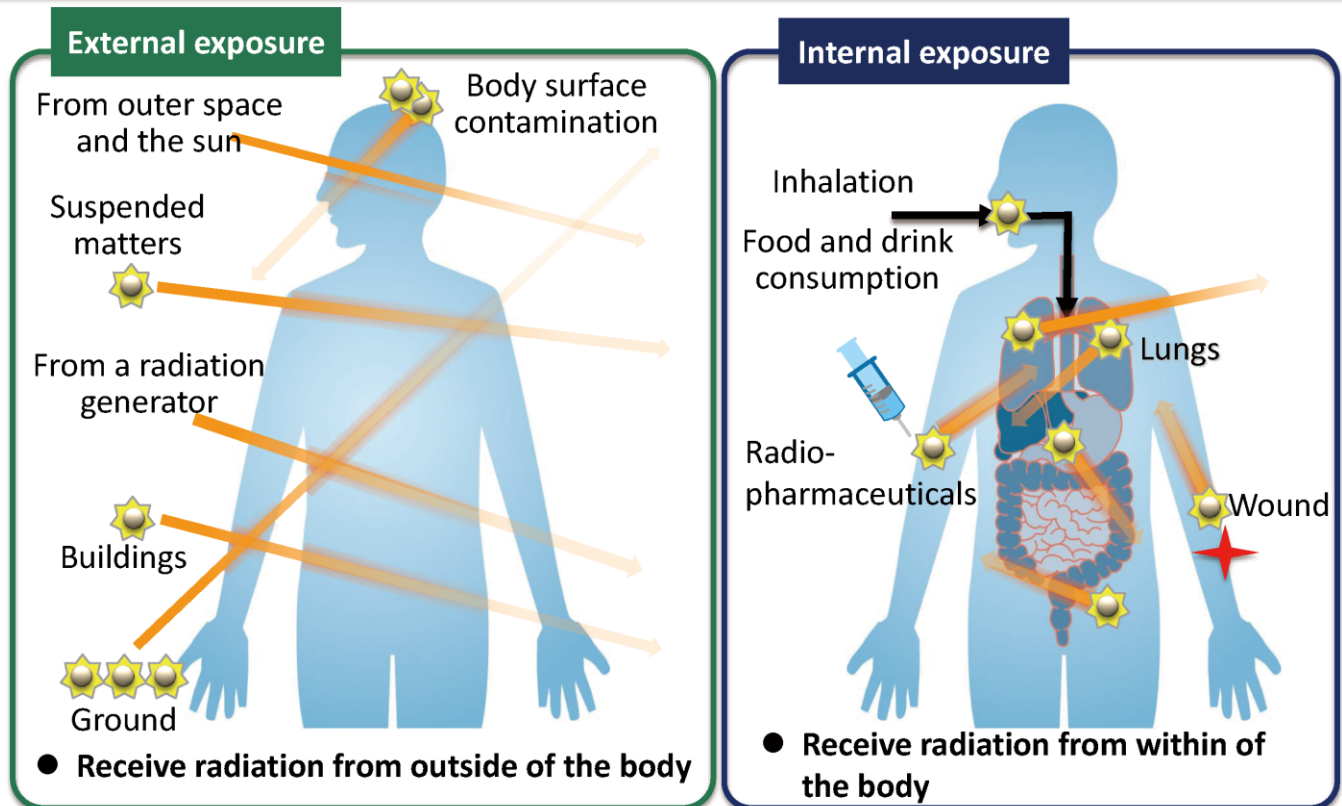
Інша класифікація ґрунтується на різниці в механізмах прояву радіаційних ефектів, тобто на **детермінованих ефектах (реакціях тканин)** і **стохастичних ефектах**.

Детерміновані ефекти (реакції тканин) - це симптоми, викликані загибеллю або дегенерацією ряду клітин, що складають органи і тканини. Наприклад, після впливу відносно великої кількості радіації протягом декількох тижнів може виникнути пошкодження шкіри або зменшення кількості клітин крові через погіршення кровотворної здатності (гострий променевий синдром). Вплив великої кількості радіації під час вагітності може спричинити певний вплив на плід, а опромінення очей через деякий час може викликати катаракту.



Exposure Routes

Internal and External Exposure



The body is equally exposed to radiation in both cases.

☀ Radioactive materials

Радіаційне опромінення - це ситуація, коли тіло піддається впливу радіоактивного випромінювання. Зовнішнє опромінення означає отримання радіації від радіоактивних матеріалів, що знаходяться на землі або в повітрі, або прикріплені до одягу чи поверхні тіла.

Внутрішнє опромінення відбувається: *коли людина приймає їжу і поглинає радіоактивні матеріали з їжею або напоями (пероральне опромінення); *коли людина вдихає радіоактивні матеріали з повітрям (інгаляційне опромінення); *коли радіоактивні матеріали поглинаються через шкіру (черезшкірне поглинання); *коли радіоактивні матеріали потрапляють в організм через рану (радіоактивне зараження); *коли радіофармацевтичні препарати, що містять радіоактивні речовини, застосовуються з метою медичного лікування. Після потрапляння радіоактивних матеріалів всередину організм продовжує зазнавати радіаційного впливу до тих пір, поки радіоактивні матеріали не будуть виведені з сечею або калом, або поки радіоактивність не ослабне з часом.

Різниця між внутрішнім та зовнішнім опроміненням полягає в тому, чи знаходиться джерело, яке випромінює радіацію, всередині або зовні тіла.

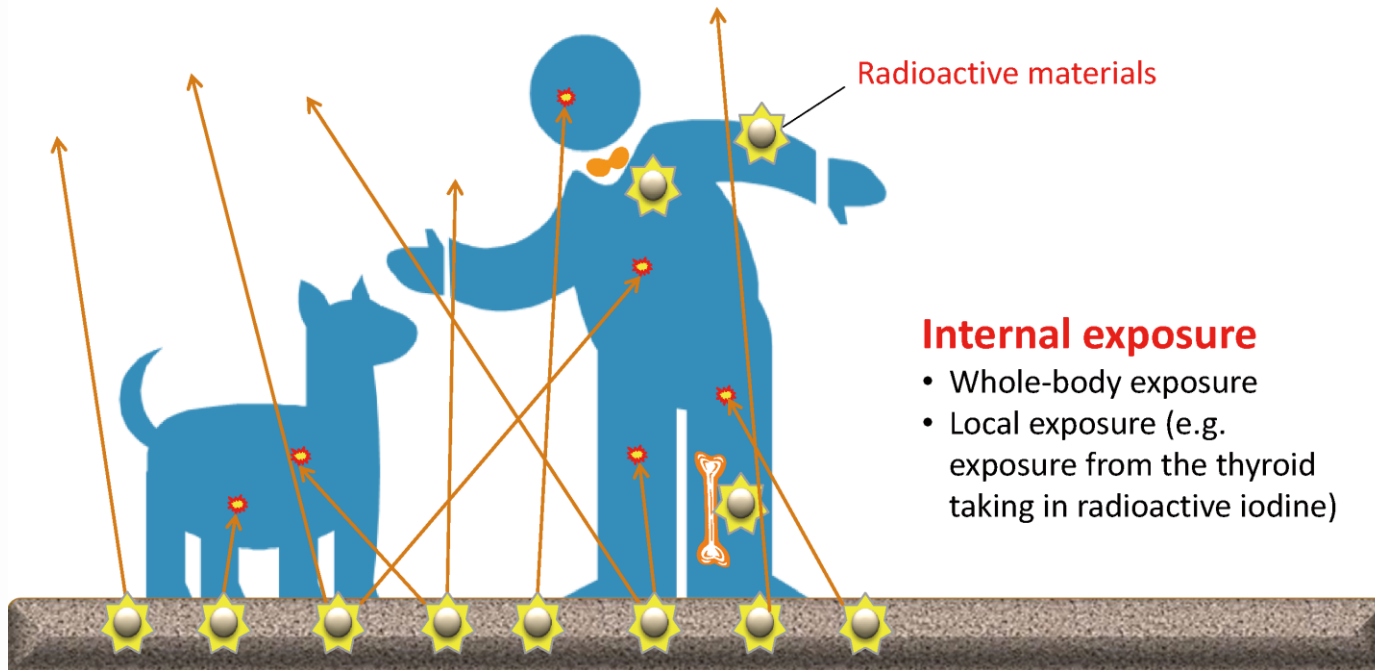
Тіло однаково піддається впливу радіації в обох випадках



Various Forms of Exposure

External exposure

- Whole-body exposure
- Local exposure (e.g. exposure by X-ray examination or local body surface contamination)



Internal exposure

- Whole-body exposure
- Local exposure (e.g. exposure from the thyroid taking in radioactive iodine)

Загальне опромінення - це опромінення всього тіла, тоді як **місцеве опромінення** - це опромінення частини тіла. При опроміненні всього тіла радіація може вплинути на всі органи і тканини, в той час як при місцевому опроміненні вплив обмежується опроміненними органами і тканинами.

Якщо будь-який орган імунної або ендокринної системи входить до складу опроміненої ділянки, віддалені органи або тканини можуть зазнати опосередкованого впливу, але основна проблема пов'язана з впливом на опромінені органи і тканини. Органи відрізняються за чутливістю до радіації. Тому при місцевому опроміненні ступінь впливу сильно варіюється залежно від того, чи є на опроміненій ділянці органи, які мають високу чутливість до радіації. При внутрішньому опроміненні високі дози радіації отримують органи і тканини, в яких, ймовірно, накопичуються радіоактивні матеріали.

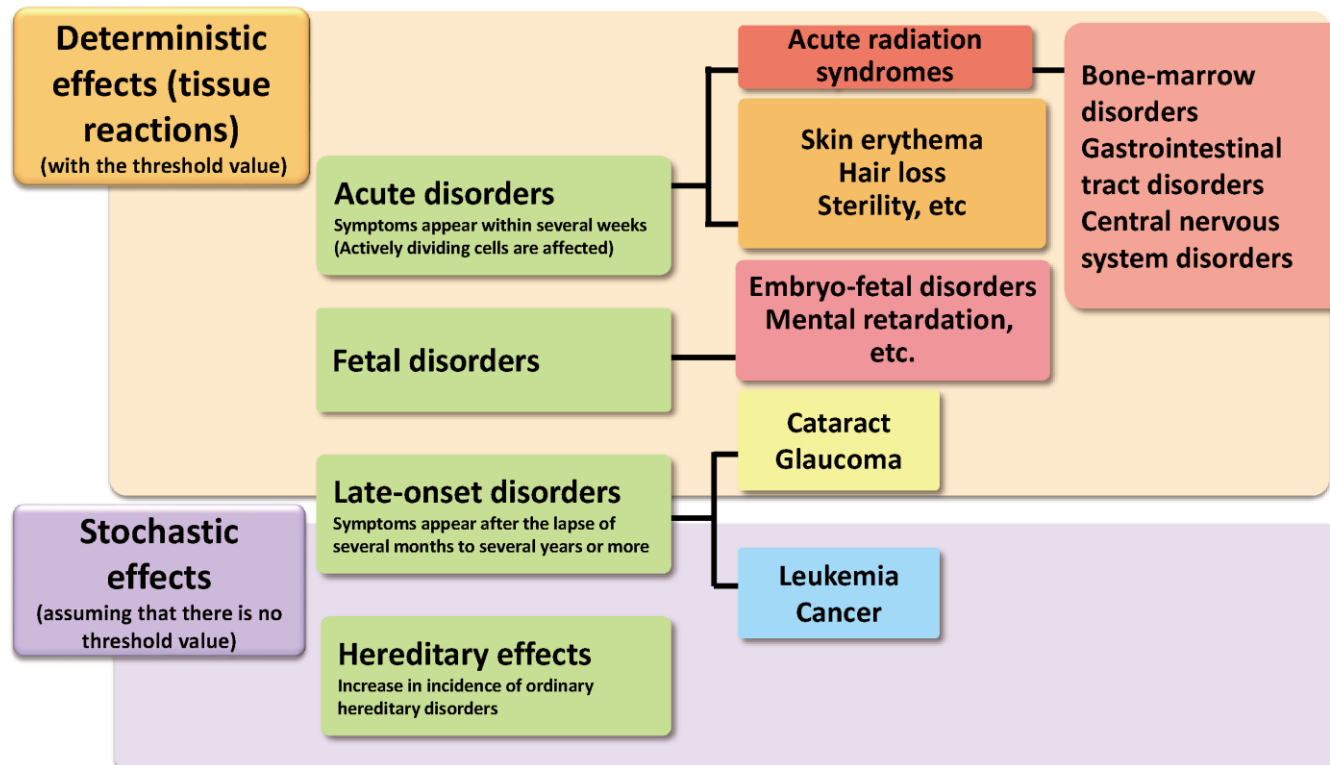
Якщо такі органи і тканини, схильні до накопичення, мають високу чутливість до радіації, вони з більшою ймовірністю будуть уражені радіацією



Effects on Human Body

Types of Effects

► Consideration is to be given to what health effects arise after radiation exposure, the amount of exposure, parts exposed to radiation (whole-body exposure or local exposure), and the exposure situation over time (acute or chronic).



Розглядаючи вплив радіації на організм людини, одним з методів є окремий розгляд стохастичних ефектів та детермінованих ефектів (реакції тканин).

Детерміновані ефекти (реакції тканин) не проявляються, якщо опромінення не перевищує певного рівня. Більшість детермінованих ефектів класифікуються як гострі розлади, симптоми яких проявляються протягом декількох тижнів після опромінення.

Стохастичні ефекти - це ефекти, виникнення яких не можна повністю виключити навіть при опроміненні в малих дозах. Дози опромінення загалом знаходяться на безпечному рівні, якщо припустити, що порогового значення не існує.

Однак не підтверджено, що спадкові порушення внаслідок опромінення з'являються у людей з тією ж частотою, що й за результатами тестів на лабораторних тваринах.

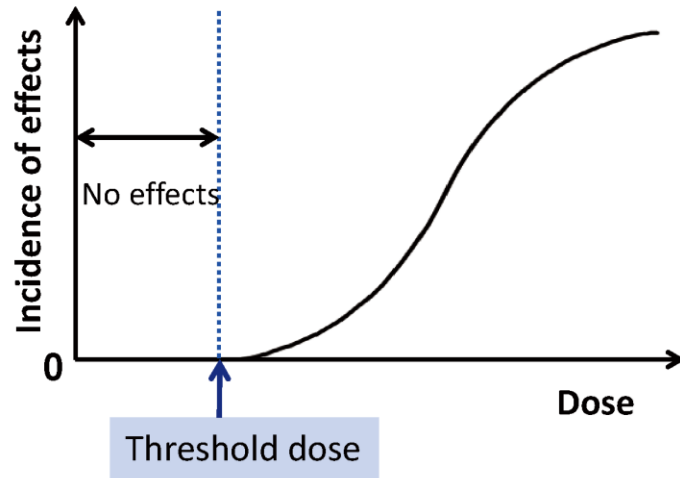


Deterministic effects (tissue reactions)

(Hair loss, cataract, skin injury, etc.)

When a number of people were exposed to the same dose of radiation and certain symptoms appear in 1% of them, said dose is considered to be the threshold dose.

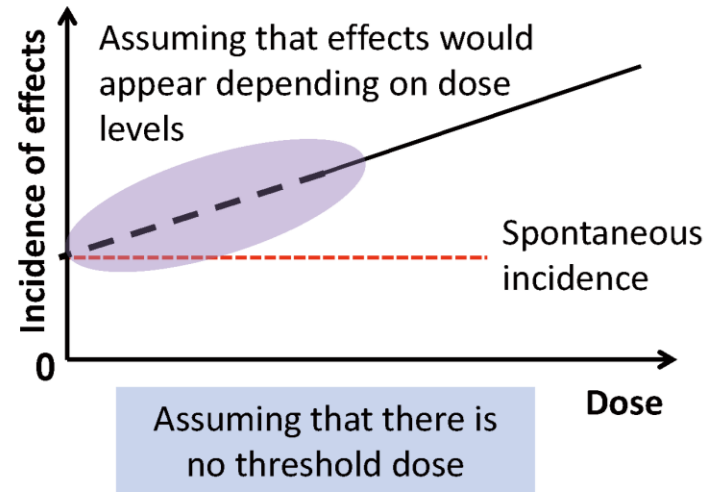
(2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP))



Stochastic effects

(Cancer, leukemia, hereditary effects, etc.)

Effects of radiation exposure under certain doses are not clear because effects of other cancer-promoting factors such as smoking and drinking habits are too large. However, the ICRP specifies the standards for radiological protection for such low-dose exposures, assuming that they may have some effects as well.



Нестохастичні ефекти / Детерміновані

Мають певні порогові рівні дози опромінення.

Ймовірність виникнення ефектів пропорційна дозі опромінення.

Між моментом опромінення і проявом ефекту спостерігається латентний період.

Тяжкість може бути пропорційною до отриманої дози.

Спостерігається, коли клітини гинуть або втрачають здатність ділитися

Стохастичні ефекти / імовірнісні

Не мають порогових рівнів дози опромінення.

Ймовірність виникнення ефектів пропорційна дозі.

Між моментом опромінення та проявом ефекту існує латентний період.

Тяжкість не залежить від отриманої дози

Спостерігається, коли клітини модифікуються, а не гинуть.

Однією з характеристик **детермінованих ефектів** (тканинних реакцій) є існування порогової дози, яка означає, що опромінення нижче цього рівня не викликає жодних ефектів, але опромінення вище цього рівня викликає ефекти. Опромінення вище порогової дози викликає загибель або дегенерацію великої кількості клітин за один раз, і рівень захворюваності різко зростає. З іншого боку, в радіологічному захисті вважається, що порогової дози для стохастичних ефектів не існує. Згідно з цим припущенням, можливість того, що опромінення навіть у дуже низьких дозах може мати певні ефекти, ніколи не може бути виключена. Епідеміологічно виявити стохастичні ефекти внаслідок опромінення в низьких дозах нижче діапазону від 100 до 200 мЗв дуже складно.



Це насамперед два типи стохастичних ефекти
Канцерогенез та Спадкові ефекти

Обидва мають:

- Випадковий характер прояву.
- Відсутність порогової дози для прояву.
- Певний латентний період для прояву після опромінення.
- Ймовірність індукції зростає з отриманою дозою.
- Тяжкість ефекту не залежить від отриманої дози.
- Ризик, який може бути визначений лише на основі епідеміологічних досліджень.

Радіаційно-індукований канцерогенез

- Відносний ризик радіаційно-індукованих раків є лінійною функцією дози до 2 Зв
- У діапазоні нижчих доз 0-0,5 Зв ризики дещо вищі, ніж екстрапольований ризик.
- Ризик виникнення радіаційно-індукованих раків змінюється з віком, причому пацієнти молодшого віку є більш сприйнятливими.
- Найбільш вразливі жінки віком до 15 років

Оцінка ризику канцерогенезу

Рак є причиною ~ 25% усіх смертей у розвинених країнах. На кожен радіаційно-індукований рак буде втрачено 13 -15 років життя (але більшість випадків трапляється у віці 68 - 70 років)

Population	High Dose, High Dose Rate	Low Dose, Low Dose Rate
Working Population	8×10^{-2} per Sv	4×10^{-2} per Sv
Whole Population	10×10^{-2} per Sv	5×10^{-2} per Sv



- Спадкові ефекти, спричинені радіацією, є вторинними по відношенню до мутацій, які передаються нащадкам
- Радіація не викликає нових типів мутацій, але збільшує частоту природних мутацій
- Відомо три класи спадкових ефектів: Генні мутації, Хромосомні аберації (синдром Дауна), Багатофакторні (дефекти нервової трубки)
- За оцінками МРЗР, ризик виникнення спадкових ефектів внаслідок радіаційного опромінення становить 0,2% на Зв у загальній популяції 0,1% на Зв у працюючого населення
- Радіочутливість різних мутацій варіює в широких межах - тому розглядається середній ризик мутацій.
- Випромінювання з низькою потужністю дози є менш ефективним в індукуванні мутацій
- Часовий інтервал між опроміненням і зачаттям відіграє важливу захисну роль. Тому між опроміненням і зачаттям рекомендується проміжок у 6 місяців.
- Мутації, викликані опроміненням, можуть передаватися через покоління.
- Середня "подвоєна доза" для людини вважається 1,56 Зв.

Disease Class	Base Frequency per million live births	First generation risk per million live	2 nd generation risk per million live births
Mendelian mutations	16500	750 - 1500	1300 - 2500
Chronic multifactorial diseases	65000	250 - 1200	250 - 1200
Congenital abnormalities Total	60000	2000	2400 - 3000
	738000	3000 - 4700	3950 - 6700
Total risk per Gy	NA	0.41 - 0.64 %	0.53 - 0.91 %



Радіаційні ризики для плоду пов'язані з

Величиною опромінення

Терміном вагітності

Радіаційні ризики є найбільш значущими під час органогенезу та в ранньому ембріональному періоді.

Поріг виникнення вад розвитку:

100 - 200 мГр (вади розвитку)

100 мГр (розумова відсталість): Коефіцієнт ризику становить 0,4 на Зв.

Опромінення безпечне для плоду - нормальне опромінення від фонового випромінювання

Доза > 0,1 Зв визнано порогом, при перевищенні якого слід розглянути питання про проведення МРТ

Час проміння проти ефекту:

2-3 тижні: Більшість ембріонів абортуються

4 - 11 тижнів: Серйозні аномалії в незабезпечених органах

11-16 тижнів: Розумова відсталість і підтримка росту більш розширені

16-25 тижнів: Легкий ступінь розумової відсталості та мікроцефалія

> 30 тижнів: зазвичай до функціональних порушень у подальшому житті

Канцерогенез:

Більшість опромінь відбувається в 3-му триместрі

Дози понад 1 мЗв підвищують ризик, але порогового значення немає.

Перевищення абсолютного ризику - 6% на кожний Зв



Exposure Situations and Protection Measures

People's exposure to radiation

Planned exposure situations	Existing exposure situations	Emergency exposure situations
<p>Situations where protection measures can be planned in advance and the level and range of exposure can be reasonably forecast</p> <p>Dose limits (Public exposure) 1 mSv/year (Occupational exposure) 100 mSv/5 years and 50mSv/year</p> <p>Measures Manage disposal of radioactive waste and long-lived radioactive waste</p>	<p>Situations where exposure has already occurred as of the time when a decision on control is made</p> <p>Reference level A lower dose range within 1 to 20 mSv/year, with a long-term goal of 1 mSv/year</p> <p>Measures Ensure voluntary efforts for radiological protection and cultivate a culture for radiological protection</p>	<p>Contingency situations where urgent and long-term protection measures may be required</p> <p>Reference level Within 20 to 100 mSv/year</p> <p>Measures Evacuate, shelter indoors, analyze and ascertain radiological situations, prepare monitoring, conduct health examinations, manage foods, etc.</p>

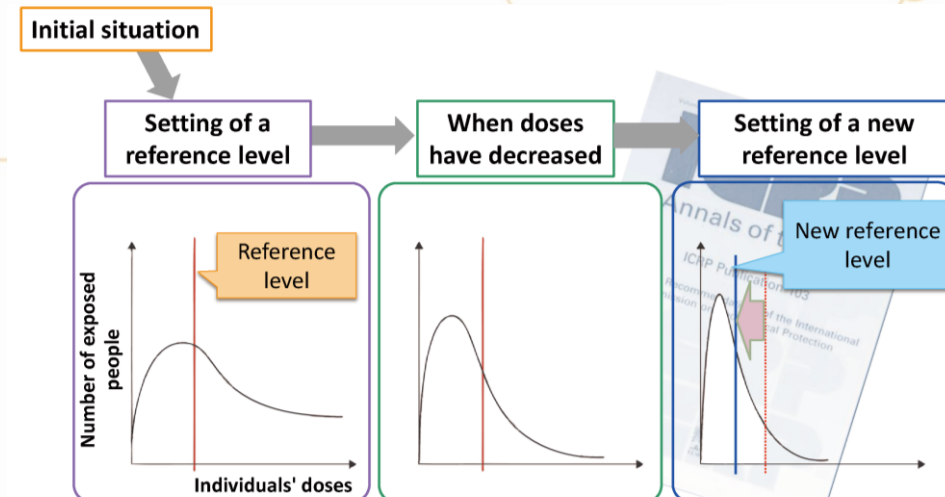
mSv: millisieverts

Source: Prepared based on the ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (ICRP, 2007)

Потім, в період відновлення (існуючі ситуації опромінення), слід встановити референтний рівень в діапазоні від 1 до 20 мЗв/рік, який є нижчим за референтний рівень в аварійних ситуаціях, але вищим за ліміти доз, що застосовуються в звичайний час.



В **аварійних ситуаціях**, таких як ядерна аварія (аварійні ситуації опромінення), оскільки можуть розвинутися фізичні розлади, які ніколи не спостерігалися б у звичайний час, пріоритет слід надавати заходам із запобігання серйозним фізичним розладам, а не заходам, яких слід вживати у звичайний час (для зменшення ризику розвитку раку в майбутньому). Для населення у звичайний час встановлюється референтний рівень від 20 до 100 мЗв/рік. Для людей, які беруть участь у надзвичайних заходах або рятувальних роботах, рівень в 1000 або 500 мЗв іноді може бути прийнятий як орієнтовний показник.



Source: Prepared based on the ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (ICRP, 2007)

Dose Reduction

Internal Exposure - Responses Immediately after a Nuclear Hazard -

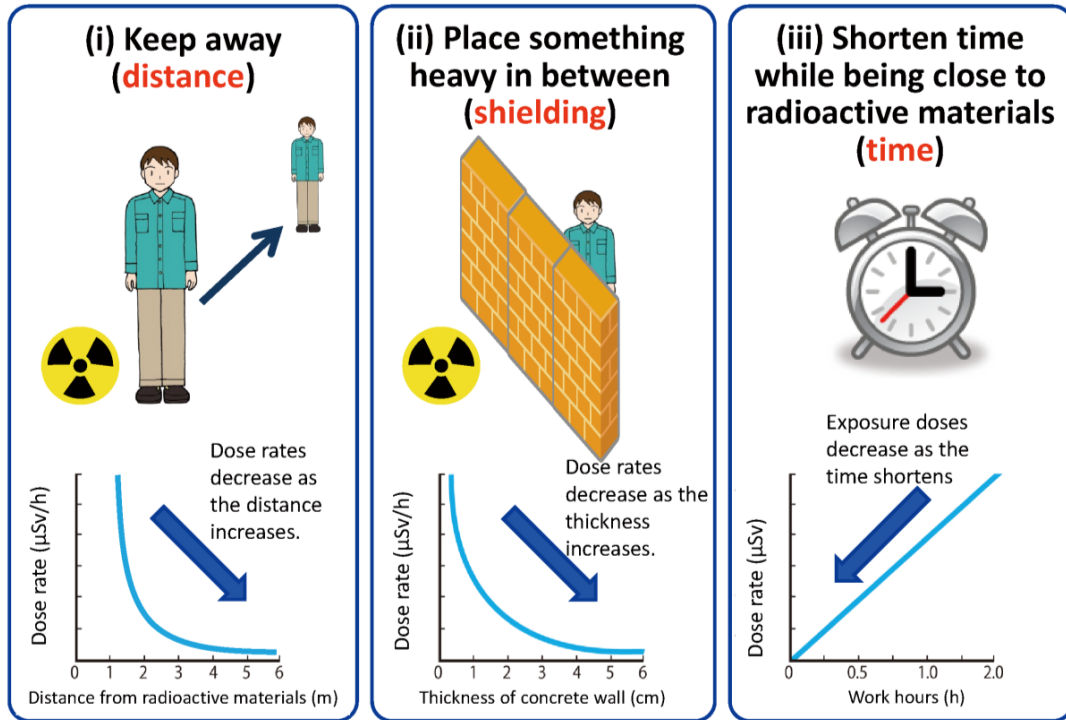
- Prevent radioactive materials from entering the body through the mouth, nose or wounds, in principle.
- Be careful not to lose nutritional balance, being excessively worried about a small amount of radioactive materials below the standard limit.
- Be aware of information on the release of radioactive materials.
- Wash off soil immediately from the body, shoes and clothes.



При розрахунку доз опромінення для дітей, які займаються активним відпочинком на свіжому повітрі в місцях з великими дозами зовнішнього опромінення, дози від внутрішнього опромінення складають лише близько 2-3%, а дози опромінення в основному зумовлені випромінюванням ззовні тіла. Тому людям не варто надто хвилюватися щодо інгалаційного опромінення, а належний щоденний гігієнічний контроль (прийняття ванни, стрижка, миття рук, прибирання та прання білизни тощо) є ефективним засобом зменшення внутрішнього опромінення до певної міри.

Щодо можливості внутрішнього опромінення внаслідок вживання продуктів харчування, слід звернути увагу на продукти, в яких радіоактивний цезій акумулюється у високих концентраціях. Зокрема, особливої уваги потребують папороті та гриби, які мають властивість концентрувати цезій.





Обмеження часу. Кількість опромінення прямо (лінійно) залежить від часу, проведеного людиною біля джерела випромінювання, і дозу можна зменшити, обмеживши час перебування.

Відстань. Кількість опромінення залежить від відстані до джерела випромінювання. Подібно до тепла від вогню, якщо ви знаходитесь занадто близько, інтенсивність теплового випромінювання висока, і ви можете отримати опіки. Якщо ви перебуваєте на правильній відстані, ви можете витримати це без проблем і почувати себе комфортно. Якщо ж ви знаходитесь занадто далеко від джерела тепла, недостатність тепла також може завдати вам шкоди. У певному сенсі цю аналогію можна застосувати і до випромінювання від джерел радіації.

Екранування. Нарешті, якщо джерело занадто інтенсивне, а час або відстань не забезпечують достатнього захисту від випромінювання, необхідно використовувати екранування. Радіаційний захист зазвичай складається з бар'єрів зі свинцю, бетону або води. Для радіаційного захисту можна використовувати багато матеріалів, це залежить від типу випромінювання, його енергії та багатьох інших параметрів. Наприклад, навіть збіднений уран можна використовувати як хороший захист від гамма-випромінювання, але уран абсолютно непридатний для захисту від нейтронного випромінювання.

International Commission on Radiological Protection (ICRP)

International Commission on Radiological Protection (ICRP)

The Commission aims to make recommendations concerning basic frameworks for radiological protection and protection standards. The Commission consists of the Main Commission and four standing Committees (radiation effects, doses from radiation exposures, protection in medicine, and application of the Commission's recommendations).

(Reference) Dose limits excerpted from ICRP Recommendations

	1977 Recommendations	1990 Recommendations	2007 Recommendations
Dose limits (occupational exposure)	50 mSv/year	100 mSv/5 years and 50 mSv/year	100 mSv/5 years and 50 mSv/year
Dose limits (public exposure)	5 mSv/year	1 mSv/year	1 mSv/year

mSv: millisieverts



Міжнародна комісія з радіологічного захисту (МКРЗ) є незалежною міжнародною неурядовою організацією, місією якої є захист людей, тварин і навколишнього середовища від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання.

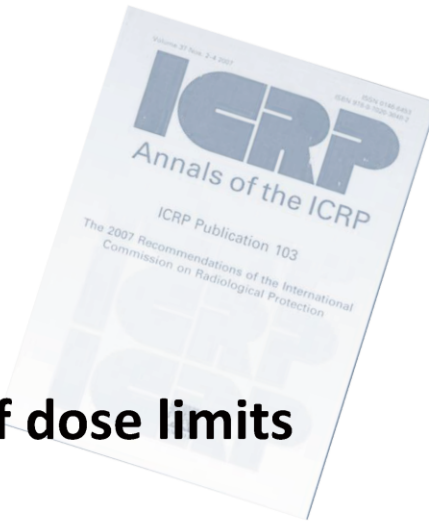
- Концепція "референтної людини" покликана допомогти в управлінні багатьма різними ситуаціями, в яких люди піддаються або можуть піддатися впливу іонізуючого випромінювання.
- МКРЗ опублікувала вичерпний звіт про референтну людину в 1975 році (ICRP, 1975) - остання редакція - в ICRP 2002. Метою опису референтної людини було
- Створити точки відліку для процедури оцінки доз опромінення людини.
- Виведення відповідних величин і одиниць для їх інтерпретації
- Розгляд взаємозв'язків між дозами в різних частинах людського тіла та їхніми ефектами.
- Більшість країн модифікували концепцію референтної людини - наприклад, індійська референтна людина



Three Fundamental Principles of Radiological Protection

ICRP's three fundamental principles of radiological protection

- **Justification**
- **Optimization**
- **Application of dose limits**



Source: ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (ICRP, 2007)

Рівень захисту розглядається на основі ідеї про те, що ризики не можуть бути повністю усунені, і що такі ризики можуть бути толерантними.

Саме на цьому ґрунтуються принципи радіологічного захисту з акцентом на **"обґрунтуванні"**, **"оптимізації"** та **"застосуванні дозових обмежень"**.



Justification of Radiological Protection

Justification



○ Adopt



✗ Do not adopt

Source: Prepared based on the ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (ICRP, 2007)

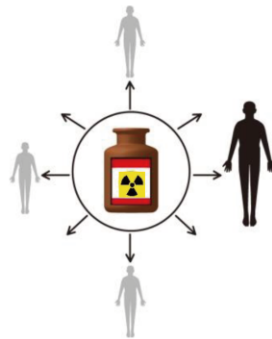
Перший принцип - обґрунтування радіологічного захисту. Це фундаментальний принцип, згідно з яким акт використання радіації дозволяється лише тоді, коли користь переважає радіаційні ризики.

Цей принцип застосовується не тільки до актів використання радіації, але й до всіх видів діяльності, які призводять до змін у ситуаціях опромінення. Іншими словами, це стосується і аварійних ситуацій опромінення, і існуючих ситуацій опромінення, і запланованих ситуацій опромінення. Наприклад, обґрунтування вимагається навіть у випадку розгляду питання про дезактивацію забруднених територій.

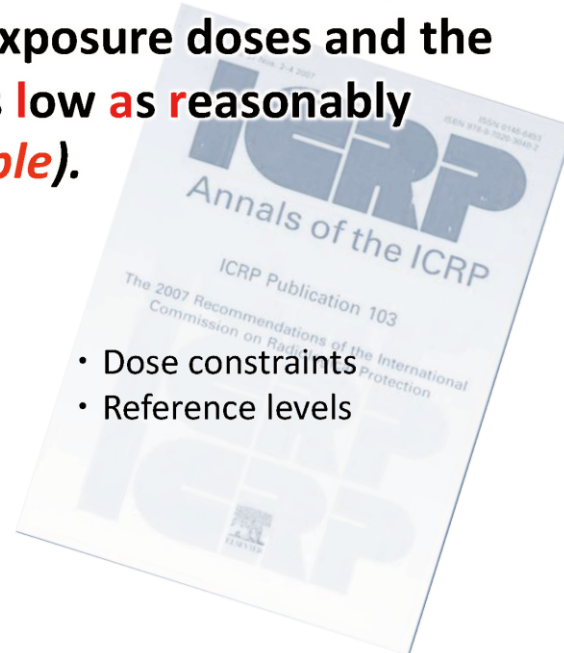


Optimization of Radiological Protection

In consideration of economic and social factors, strive to reduce individuals' exposure doses and the number of exposed people **as low as reasonably achievable** (*the ALARA principle*).



- Dose constraints
- Reference levels



Source: Prepared based on the ICRP Publication 103, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (ICRP, 2007)

Другий принцип - оптимізація радіологічного захисту. Коли переваги використання випромінювання переважають радіаційні ризики, приймається рішення про використання випромінювання шляхом застосування заходів для зменшення дози опромінення до розумно досяжного мінімуму. Це називається принципом ALARA. Оптимізація радіологічного захисту означає бажання зменшити дози опромінення до якомога нижчого рівня, беручи до уваги соціальний та економічний баланс, і не обов'язково означає мінімізацію доз опромінення. З метою сприяння оптимізації радіологічного захисту використовуються дозові обмеження та референтні рівні. Референтні рівні приймаються як індикатори для обмеження доз опромінення людей від конкретних джерел іонізуючого випромінювання, наприклад, при проведенні робіт з дезактивації.



Dose Limits Relation between Exposure Doses and Health Risks

- Deterministic effects (tissue reactions)
- Cancer risks increase.



The level of cancer risks is unknown (or minor if any).

(mSv/year)

100



20

Range of reference levels in an emergency

1

Range of reference levels in a recovery and reconstruction period

- Lower than the level of risks due to natural radiation.



- Cumulative lifetime exposure doses below 100 mSv

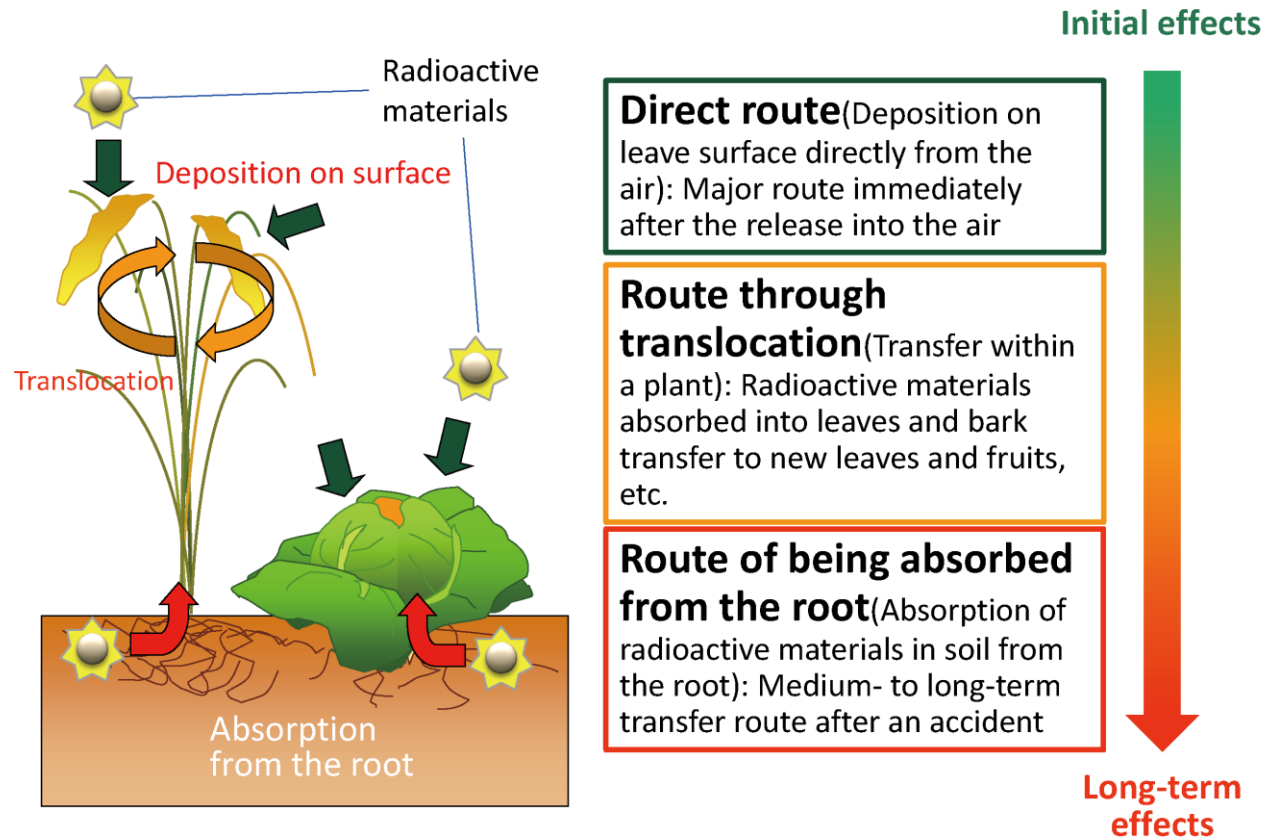
Source: Prepared based on the 2007 Recommendations of the ICRP

Існують наукові докази того, що дози опромінення від 100 до 200 мЗв і більше за відносно короткий час збільшують детерміновані ефекти (реакції тканин) і ризик розвитку раку. *Тому в надзвичайних ситуаціях, пов'язаних з радіаційною аварією, початковий референтний рівень встановлюється таким чином, щоб уникнути річних доз опромінення в 100 мЗв або більше, щоб запобігти серйозним фізичним розладам.* Коли ситуація покращується, коли аварію взято під контроль і майже ніхто не отримує високу дозу, що перевищує початковий контрольний рівень, встановлюється новий нижчий контрольний рівень (наприклад, від 1 до 20 мЗв на рік), щоб обмежити зростання ризиків будь-якого можливого раку в майбутньому, тим самим сприяючи подальшому зниженню дози опромінення. За стандартну межу в нормальний час прийнято 1 мЗв/рік. Як наслідок, дехто неправильно розуміє, що опромінення, яке перевищує 1 мЗв на рік, є небезпечним, або що вони можуть зазнати опромінення, яке перевищує цей рівень. Однак ліміти доз не є межею, що розділяє безпеку і небезпеку.



Long-term Effects

Transfer to Plants



Оскільки Cs-137 має тривалий період напіврозпаду - 30 років, то після потрапляння в навколишнє середовище внаслідок аварії на атомній електростанції або з інших причин, його вплив може бути тривалим. Існує приблизно три шляхи, якими радіоактивні матеріали з навколишнього середовища потрапляють до їстівних частин сільськогосподарських культур.

Перший - це шлях, коли радіоактивні матеріали прилипають до поверхні їстівних частин культур безпосередньо з повітря. **Другий** - це шлях через транслокацію. Транслокація - це явище, при якому поглинені поживні речовини або метаболіти, вироблені в процесі фотосинтезу, переносяться з однієї тканини в іншу тканину рослини. Радіоактивні матеріали, які прилипають до листя або кори, іноді поглинаються і переносяться в нові листя і плоди рослини. **Третій** шлях - це шлях, коли радіоактивні матеріали, що знаходяться в ґрунті, поглинаються з кореня. Після того, як викид радіоактивних матеріалів у повітря припиниться, радіоактивні матеріали, що потрапили на сільськогосподарські угіддя, в основному підуть цим шляхом і будуть поглинатися культурами з кореня.



Long-term
Effects

Distribution of Radioactive Cesium in Soil

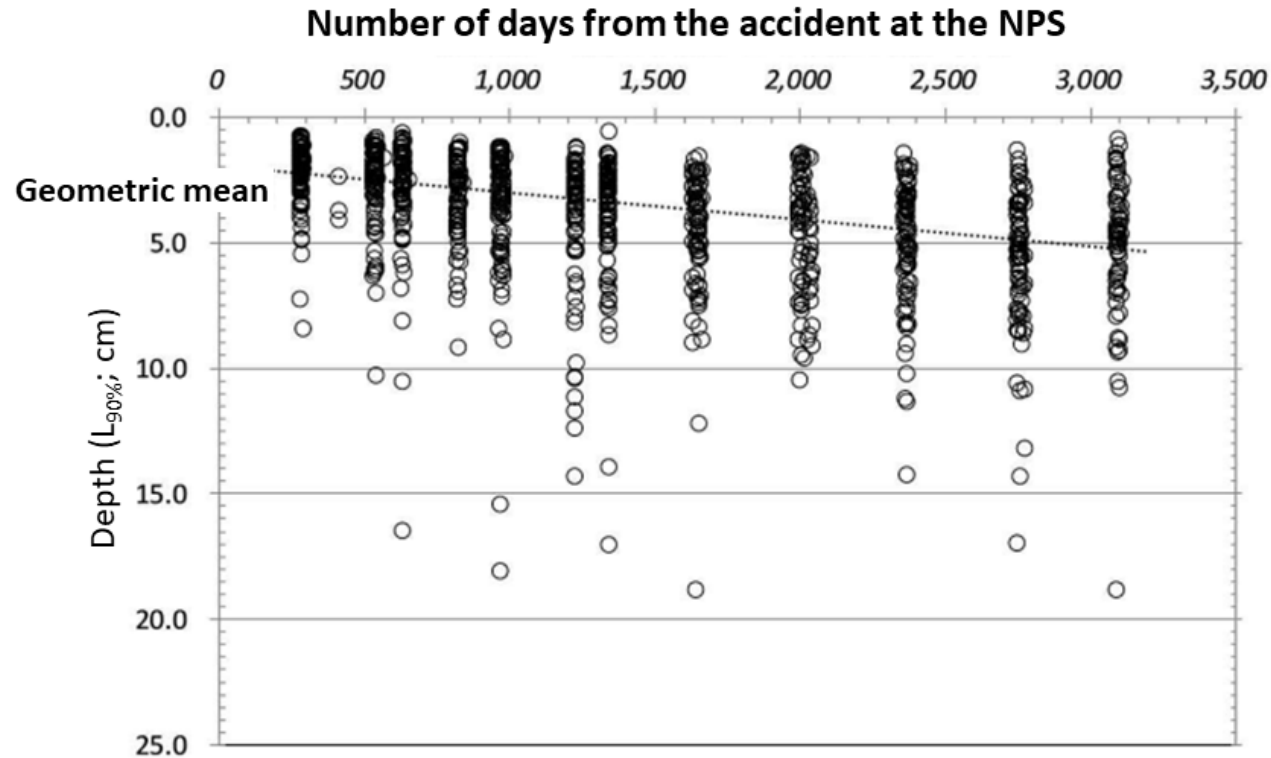


Figure: Data on changes over time in $L_{90\%}$ * since December 2011 (85 locations at uncultivated land in Fukushima Prefecture, the southern part of Miyagi Prefecture and the northern part of Ibaraki Prefecture)

(Reference) Depth ($L_{90\%}$): The depth from the ground surface where 90% of all deposited radioactive cesium is contained

Source: Prepared based on the outcome report, "Survey of Depth Distribution of Radioactive Cesium in Soil," of the FY2019 project, "Compilation of Data on Distribution of Radioactive Materials Released due to the Accident at Tokyo Electric Power Company (TEPCO)'s Fukushima Daiichi NPS" commissioned by the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority

Дослідження наслідків аварії на АЕС Фукусіма Дайїчі, що сталася у 2011 році, показало, що глибина від поверхні землі, на якій знаходиться 90% всього радіоактивного цезію, що випав, з часом поступово змінювалася, і середнє геометричне значення станом на вересень 2019 року становило 4,6 см.

Дослідження наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, що сталася у 1986 році, показало, що близько 80% Cs-137, який випав на ґрунт внаслідок аварії, залишається на глибині до 10 см від поверхні ґрунту навіть через 14 років після аварії.



Long-term Effects

Behavior of Radioactive Cesium in the Environment: Adsorption and Fixation by Clay Mineral

Adsorption and fixation of cesium

Fig. 14

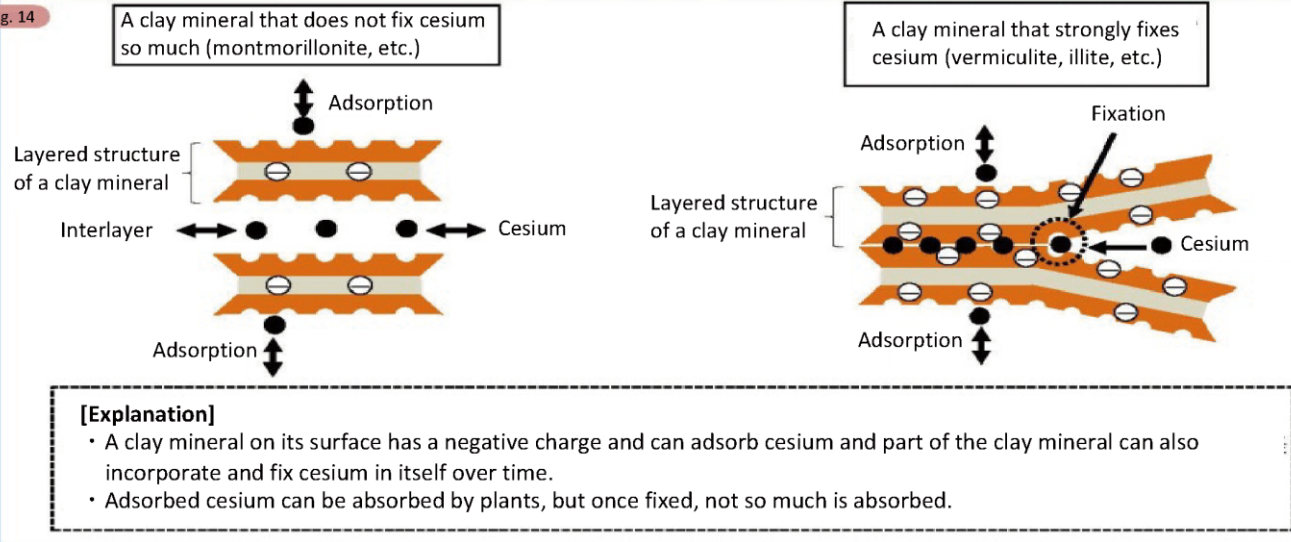


Table 4

Soil components	Adsorption of Cs	Fixation of Cs
Soil organic matters	Strong	Weak
Clay minerals (non-micaceous)		
Kaolinite, Halloysite	Strong	Weak
Allophane, Imogolite	Strong	Weak to medium
Montmorillonite	Strong	Weak
Clay minerals (micaceous)		
Vermiculite	Strong	Strong
Illite	Strong	Medium to strong
Aluminum vermiculite	Strong	Medium to strong
Zeolite	Strong	Strong (Note)

[Explanation]

- Soil organic matters and non-micaceous clay minerals, such as montmorillonite, have weak fixation power.
- Micaceous clay minerals, such as vermiculite and illite, strongly fix cesium.

(Note) Anchoring power of these components varies depending on production areas and qualities.

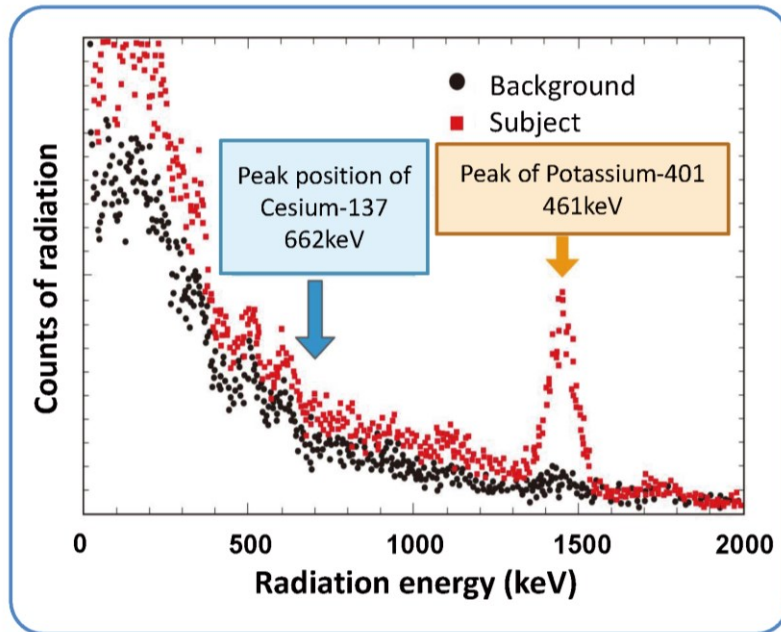
Цезій має подібні хімічні властивості з калієм (позитивний заряд) і може легко адсорбуватися глинистими мінералами, які мають негативний заряд на поверхні. Більше того, деякі глинисті мінерали мають здатність фіксувати цезій, який вони адсорбували, з плином часу.

Відомо, що після фіксації цезій стає важкорозчинним у воді.

Дані про внутрішнє опромінення, виміряні методом прямого підрахунку



Whole-body counter



Measure radiation emitted from within the body \Rightarrow Measure internal radioactivity for each radioactive material

The amount of potassium in the body is around 2 g per 1 kg of body weight, and approx. 0.01% of that amount is radioactive potassium (Potassium-40)

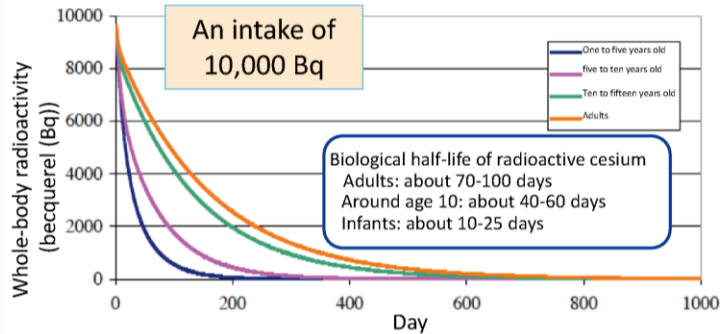
Радіоактивність кожного нукліда можна кількісно оцінити, вимірявши випромінювання, що виходить зсередини тіла, за допомогою лічильника для всього тіла. Чорні круглі точки на графіку представляють значення фону.

Коли суб'єкт знаходиться на ліжку, з'являються піки випромінювання, як показано червоними квадратними крапками. Енергія γ -променів є унікальною для кожного радіоізоотопу. Наприклад, **радіоактивний калій, K-40, випромінює γ -промені з енергією 1,461 кеВ.** Тому, якщо виявляється така кількість енергії, це свідчить про наявність K-40 в організмі. Енергія **гамма-випромінювання цезію-137 становить 662 кеВ.** Хоча калій є елементом, необхідним для життя, приблизно 0,01% всього калію є радіоактивним.

Радіоактивний калій в основному міститься у воді в клітинах і присутній у м'язах, але рідко присутній у жирових клітинах, які містять мало ВОДИ.



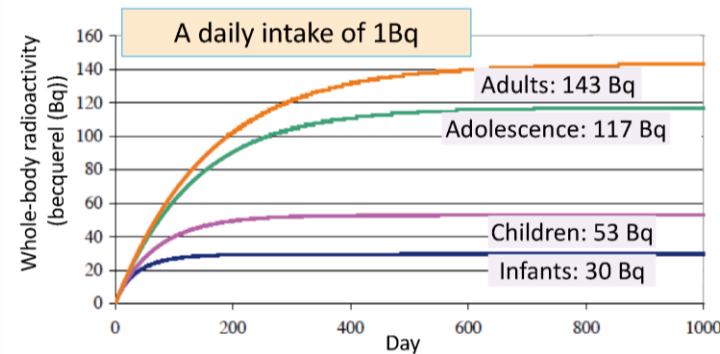
Радіоактивність в організмі та оцінка дози опромінення



The younger a person is, the faster the metabolism.

Estimation of initial exposure

- will be effective for no longer than around a year even for adults.
- will be effective for up to around half a year for children.



The younger a person is, the smaller the amount of radioactive materials remaining in the body.

In estimating additional exposure through ingestion,

- finite values are unlikely to be obtained for children.
- it is more reasonable to examine adults in order to detect trace intake.

Source: Prepared based on a material released for the Japan Society of Radiation Safety Management Symposium in Miyazaki (June 29, 2012)

Лічильники для всього тіла (ЛВТ) можуть вимірювати вміст радіоактивності в організмі в день вимірювання. Як і інші прилади для вимірювання радіації, лічильники мають межу виявлення, яка залежить від їхньої продуктивності та часу підрахунку. Оскільки, біологічний період напіврозпаду радіоактивного цезію становить 70-100 днів, приблизно один рік після аварії буде межею часу для оцінки початкового навантаження на організм (у випадку одноразового надходження). Радіоактивність цезію, інкорпорованого в організм, зменшується приблизно за рік майже до нуля, тобто до рівня, що передувало надходженню в організм. Подальший підрахунок радіоактивності всього тіла проводиться з метою оцінки хронічного опромінення, в основному від продуктів харчування. На противагу цьому, підрахунок радіоактивності всього тіла у дітей, ймовірно, дасть значення, нижчі за межу виявлення, оскільки сліди початкового опромінення можуть спостерігатися лише близько півроку, а залишкова радіоактивність в організмі, накопичена внаслідок хронічного опромінення, також є невеликою через швидкий метаболізм дітей. У таких випадках доцільніше обстежувати дорослих і оцінювати їхні дози внутрішнього опромінення з точки зору детального розуміння ситуації з внутрішнім опроміненням, беручи до уваги той факт, що коефіцієнти поглиненої ефективної дози подібні як для дітей, так і для дорослих, хоча їхні швидкості метаболізму суттєво відрізняються. Радіонукліди з коротким ефективним періодом напіврозпаду, такі як I-131, не можуть бути виявлені за допомогою приладу WBC або іншого обладнання для вимірювання радіації після їх розпаду.





Co-funded by
the European Union

Radiation Safety: European-Ukrainian Approach



Radiation Safety: European-Ukrainian Approach

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.