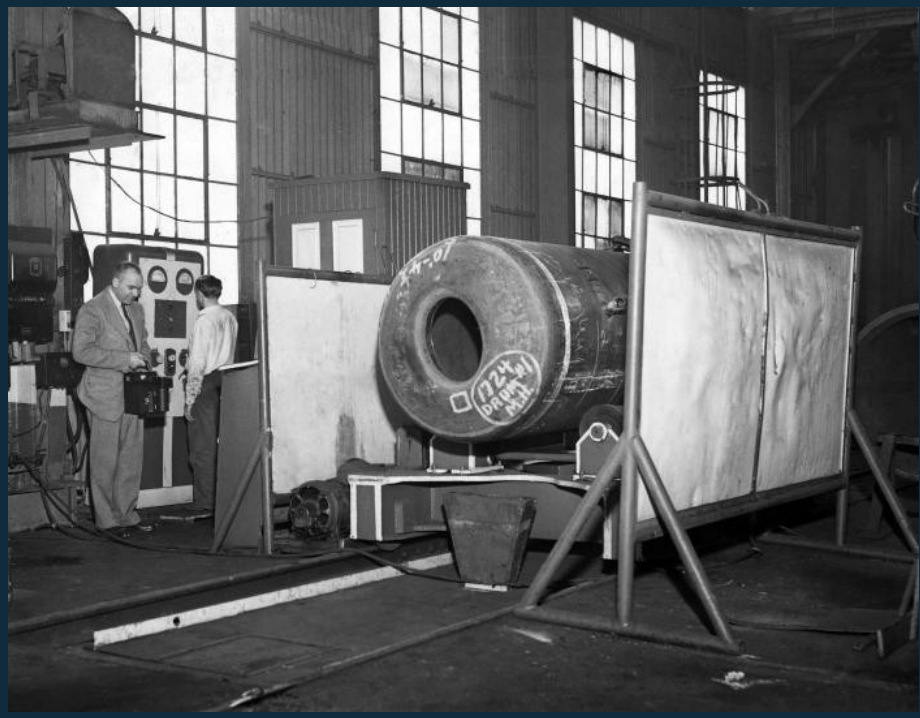
Дәріс 15.
Өнеркәсіптегі радиоактивті сәулелену көздері. Сәулелену типтері, радиацияның адам ағзасына әсері



Дәріскер: х.ғ.к., доцент

Кудьярова Ж.Б.

Дәрістің мақсаты: білім алушыларды өнеркәсіптегі радиоактивті сәулелену көздерімен таныстыру, сәулелену типтерін сипаттау және радиацияның адам ағзасына әсерін бағалау.

Көз, сәуле және адамға әсер

Өндірістік міндетке көз таңдау үшін сәуленің қалай түзілетінін және қандай сигнал тіркелетінін білу қажет.

Талдау сұрағы	Қаралатын шама	Өндірістік мысал
Сәуле қалай түзіледі?	Ядроның ыдырауы немесе электрлік генерация	Жабық ^{192}Ir көзі немесе рентген түтігі
Детектор нені тіркейді?	Өткен не шашыраған сәуле	Дәнекер жігіндегі контраст, өнім қалыңдығы
Адамға әсер қалай бағаланады?	Жұтылған доза, доза қуаты және әсер ету жолы	Жұмыс аймағы мен жеке дозиметрия

Өнеркәсіптік көздер: жабық көз, ашық көз және генератор

Құрылғының түрі сәулелену мен радиоактивті ластануды бақылау тәсілін анықтайды.

Көз түрі	Жұмыс принципі	Бақылау міндеті
Жабық радионуклидтік көз	Радионуклид герметикалық капсулада. Ыдырау үздіксіз жүреді.	Сыртқы сәулелену, капсула тұтастығы және көзді есепке алу
Ашық радионуклидтік көз	Радиоактивті зат қоршаған ортаға таралуы мүмкін.	Беткі және ауадағы ластану, ішке түсу қаупі
Рентген генераторы	Үдетілген электрондар анодта тежеліп, рентген фотондарын шығарады.	Кернеу берілген кездегі сәулелену және қорғаныс блоктауы

> Жабық көз экран ішінде де ыдырауын жалғастырады. Экран сыртқа шығатын сәулені әлсіретеді.

Өнеркәсіпте қандай көздер қолданылады?

Көздің сәуле түрі материалға, бақылау міндетіне және детекторға сәйкес таңдалады.

Қолданылуы	Көздің мысалы	Өлшенетін белгі
Өнеркәсіптік радиография	^{192}Ir немесе ^{60}Co γ-көзі. Рентген түтігі де қолданылады.	Дәнекер жігі мен құймадағы ішкі ақау белгілері
Деңгей мен тығыздықты бақылау	^{137}Cs немесе ^{60}Co γ-көзі	Өткен фотондардың тіркелу жылдамдығы
Жұқа өнімнің қалыңдығын өлшеу	^{85}Kr β-көзі қолданылатын жүйелер	Қағаз не үлдірдің аудандық массасы
Ылғалдылықты бақылау	Кейбір аспаптарда ^{241}Am–Be нейтрон көзі	Сутекке сезімтал баяулаған нейтрондар сигналы

Радиометриялық өлшегіштің сигналы

Радиометриялық өлшегіш материалдан өткен немесе кері шашыраған сәулені тіркеп, калибрлеу арқылы қасиетті анықтайды.



Асфальт тығыздығын бақылайтын өлшегіш

Өткізу геометриясы

Көз бен детектор материалдың екі жағында тұрады. Құрам тұрақты болса, қалыңдық не тығыздық артқанда бастапқы шоқ әлсірейді.

Кері шашырау геометриясы

Көз бен детектор бір жағында орналасады. Тіркелген шашырау калибрлеу қисығымен салыстырылады.

Калибрлеу кезінде материал құрамы мен өлшеу геометриясы ескеріледі.

Сәулеленудің негізгі түрлері

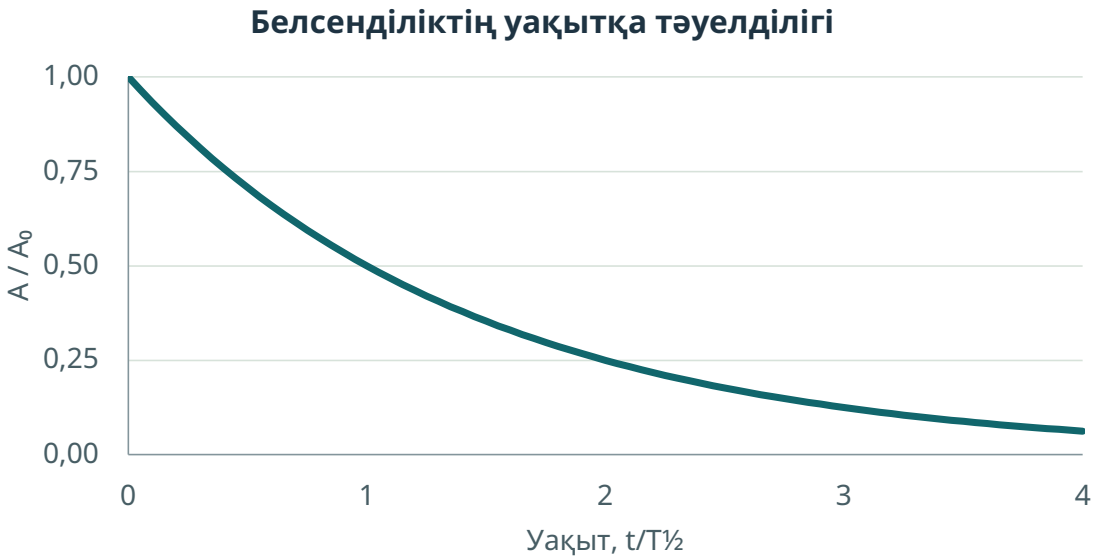
Зарядталған бөлшектер затты тікелей иондайды. Фотондар мен нейтрондар энергияны екінші реттік бөлшектер арқылы береді.

Сәуле	Физикалық табиғаты	Затпен әрекеттесу ерекшелігі
α	Гелий ядросы $^{4}He^{2+}$	Иондау тығыздығы жоғары. Тіндегі жүріс жолы қысқа.
β^- және β^+	Электрон және позитрон	Иондау және шашырау. Тежелу сәулесі пайда болуы мүмкін.
γ және рентген	Электромагниттік фотондар	Фотоэффект, Комптон шашырауы, жеткілікті энергияда жұп түзілуі.
Нейтрондар	Зарядсыз бөлшектер	Ядролармен шашырау және қармалу. Екінші реттік сәуле түзілуі мүмкін.

> Өтімділік сәуле энергиясы мен ортаның құрамына тәуелді. Қорғаныс материалы осы деректермен таңдалады.

Белсенділік және жартылай ыдырау

Белсенділік A уақыт бірлігіндегі ядролық ыдыраулар санын сипаттайды. 1 Bq = 1 s^{-1}.



$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

Жартылай ыдырау кезеңі

$\lambda = \ln 2 / T_{½}$. ^{192}Ir үшін $T_{½} \approx 73{,}8$ тәулік, ^{60}Co үшін $T_{½} \approx 5{,}27$ жыл.

Белсенділік пен доза

Доза сәуле энергиясына, геометрияға, экранға және әсер уақытына тәуелді.

Фотондардың затта әлсіреуі

Біртекті орта мен моноэнергиялық тар шоқ үшін бастапқы қарқындылық экспонента бойынша кемиді.

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

$$x_{½} = \ln 2 / \mu$$

μ — сызықтық әлсіреу коэффициенті.
Ол фотон энергиясы мен материалға тәуелді.

x½ — бастапқы қарқындылықты екі есе азайтатын қабат қалыңдығы.



Дәнекер жігінің радиограммасын оқу

Өткен сәуленің қарқындылығы жол бойындағы материал мөлшеріне тәуелді. Осы айырма кескінде контраст береді.



16Mo3 болат пластинасының радиограммасы

Бақыланатын белгі

Жіктің бойында созылыңқы және дөңгелек қараңғы аймақтар көрінеді. Материал аз жерде осы пленкаға көбірек сәуле түскен.

Қорытындының шегі

Радиограмма ақауды екі өлшемде көрсетеді. Тереңдігін бағалау үшін басқа проекция немесе қосымша әдіс керек.

Белсенділік, доза және доза қуаты

Радиациялық өлшемді түсіндіру үшін бірлікпен бірге өлшенген шаманы атау қажет.

Шама	Формула немесе анықтама	Өлшем бірлігі
Белсенділік A	$A = \lambda N$. Бір секундтағы ыдырау саны.	Bq, беккерель
Жұтылған доза D	$D = d\bar{\varepsilon}/dm$. Бірлік массаға берілген орташа энергия.	Gy, грей = J/kg
Эквивалентті доза H_t	$H_t = \Sigma\, w_r D_{t,r}$. Сәуле түрлері бойынша салмақтау.	Sv, зиверт
Тиімді доза E	$E = \Sigma\, w_t H_t$. Тіндер бойынша салмақтау.	Sv, зиверт
Доза қуаты	Дозаның уақыт бойынша өзгеру жылдамдығы.	Мысалы, μSv/h

Сыртқы сәулелену және ішкі түсу

Радионуклид денеден тыс сәуле көзі бола алады немесе ластану арқылы ағзаға енуі мүмкін.

Жағдай	Әсердің пайда болуы	Қандай бақылау жүргізіледі?
Сыртқы сәулелену	Сәуле денеден тыс көзден келеді. Өтімді фотондар тінге энергия береді.	Аймақтық доза қуаты және жеке сыртқы дозиметрия
Сыртқы ластану	Радиоактивті материал теріге, киімге немесе бетке түседі.	Ластануды өлшеу, қажет болса сүртінді сынамасы
Ішкі сәулелену	Радионуклид тыныс, ас қорыту немесе жара арқылы ішке түседі.	Биоөлшем, радионуклидке сәйкес ішкі дозаны бағалау

Энергияның тінде берілуі

Иондау тығыздығы сәуленің тіндегі микроскопиялық зақымының сипатын өзгертеді.

Сызықтық энергия берілуі · LET

Бөлшек траекториясының бірлік ұзындығына жергілікті берілетін энергия. Жиі keV/μm бірлігі қолданылады.

Фотон және α бөлшек

Фотон энергияны екінші реттік электрондарға береді. α бөлшек қысқа жолда тығыз иондау ізін қалдырады.

Оқшау зақым

Траекторияда бөлек орналасқан иондаулар жеке негіздің өзгеруіне немесе бір тізбектің үзілуіне әкелуі мүмкін.

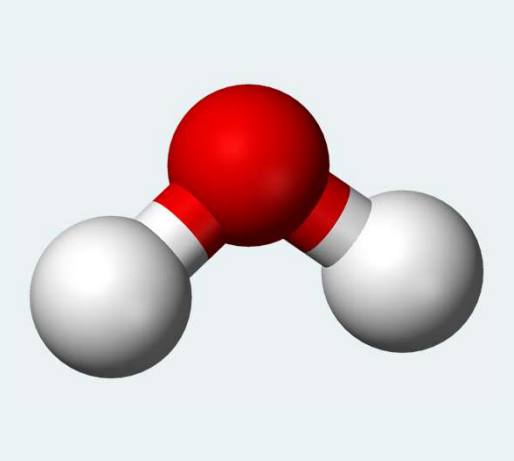
Кластерлік зақым

Бір-біріне жақын бірнеше зақым жасушаның қалпына келтіруін күрделендіреді.

> LET — энергия берілуінің физикалық сипаттамасы. w_r — радиациялық қорғау есебіндегі салмақ коэффициенті.

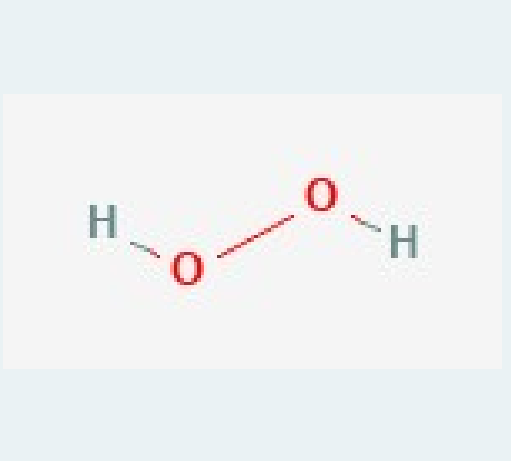
Судың радиолизі және реактивті бөлшектер

Жасуша суы иондалғанда химиялық реакциялар тізбегі басталады. Реактивті өнімдер ДНҚ-ны жанама зақымдай алады.



H_2O · O–H байланыстары

Benjah-bmm27, қоғамдық игілік



H_2O_2 · O–O байланысы

PubChem CID 784

Алғашқы иондау

Ионданған су көршілес су молекуласымен әрекеттесіп, гидроксил радикалын (•OH) түзеді.

$$H_2O^{\bullet+} + H_2O \rightarrow H_3O^+ + {\bullet}OH$$

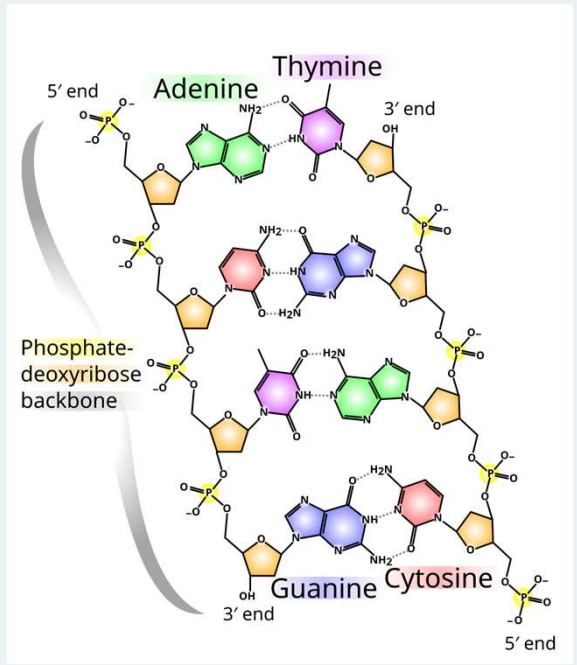
$$2\ {\bullet}OH \rightarrow H_2O_2$$

Радикалдар ДНҚ негіздерін немесе дезоксирибозаны тотықтыра алады.

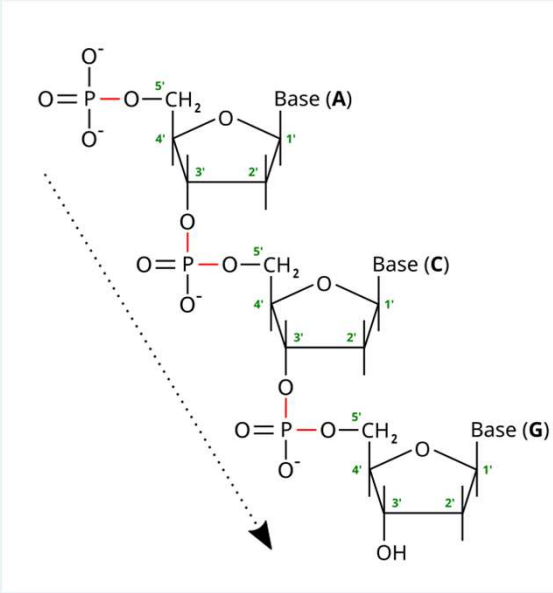
> Сұлбада радиолиздің екі реакциясы көрсетілді. Нақты өнімдердің шығымы орта мен сәуле сапасына тәуелді.

ДНҚ-дағы байланыстар және зақым түрлері

ДНҚ қаңқасын ковалентті фосфодиэфирлік байланыстар ұстайды. Екі тізбек арасында негіздер жұптасады.



Қос тізбек · Madprime, CC BY-SA 3.0



Қаңқа · Emmanuel Douzery, CC BY 4.0

Негіздердің жұптасуы

A–T арасында екі, G–C арасында үш сутектік байланыс түзіледі.

Тікелей зақым

ДНҚ-да энергияның жергілікті берілуі иондану мен химиялық өзгерістерге әкеледі.

Жанама зақым

Су радиолизінен туған реактивті бөлшектер негізді немесе қант-фосфат қаңқасын зақымдайды.

ДНҚ зақымынан жасуша жауабына дейін

Жасушаның жауабы зақым түріне, оның орналасуына және қалпына келу мүмкіндігіне байланысты.

Зақым	Молекулалық өзгеріс	Ықтимал жасушалық нәтиже
Негіздің өзгеруі	Мысалы, гуанин тотығып, 8-оксогуанин түзілуі мүмкін.	Дұрыс репарация немесе репликация кезінде қате жұптасу
Бір тізбектің үзілуі	Қант-фосфат қаңқасының бір тізбегіндегі үзіліс.	Көп жағдайда қалпына келеді. Репликация үдерісін қиындатуы мүмкін.
Қос тізбекті үзіліс	ДНҚ-ның екі тізбегі бір-біріне жақын жерде үзіледі.	Репарация, хромосомалық өзгеріс немесе жасушаның өлуі

> Дұрыс қалпына келу жасушаның қызметін сақтайды. Қате репарациядан кейін тұрақты генетикалық өзгеріс қалуы мүмкін.

Тіндік реакциялар және стохастикалық әсер

Биологиялық салдарды түсіндіруде әсердің пайда болу ықтималдығы мен ауырлығы бөлек бағаланады.

Белгі	Тіндік реакция	Стохастикалық әсер
Дозаға тәуелділігі	Тін мен әсерге тән шек бар. Шектен жоғарыда ауырлық артады.	Доза артқан сайын әсердің пайда болу ықтималдығы өседі.
Мысал	Тері реакциясы, көзбұршақтың зақымдануы, сүйек кемігі қызметінің бұзылысы	Сәулеленуге байланысты қатерлі ісік қаупінің артуы
Бағалау тәсілі	Тіннің жұтылған дозасы, сәулеленген көлем және доза қуаты	Қорғауда тиімді доза мен популяциялық тәуекел моделі

> Тіндік реакцияның шегі тінге, әсердің түріне және дозаның берілу уақытына тәуелді.

Ағзаның жауабын өзгертетін жағдайлар

Бірдей орташа доза әр тінде және әртүрлі уақыт аралығында әртүрлі әсер беруі мүмкін.

1 **Доза және оның берілу жылдамдығы**

Қысқа уақытта берілген үлкен дозада жасушаның зақымды қалпына келтіруге мүмкіндігі азаяды.

2 **Сәулеленген көлем және тіннің сезімталдығы**

Жергілікті әсер бір тінді зақымдауы мүмкін. Дененің көп бөлігі сәулеленсе, сүйек кемігі мен басқа жүйелер қатар әсер алады.

3 **Сәуленің түрі және түсу жолы**

Энергия берілуі мен таралуына сәуле сапасы, ал ішкі әсерге радионуклидтің ағзадағы таралуы ықпал етеді.

Аймақтық бақылау және жеке дозиметрия

Өлшеу аспабы сәуле түріне, диапазонға және бақыланатын шамаға сай таңдалады.



Аймақтық аспап

Доза қуатын немесе ластану сигналын өлшейді. Санау жылдамдығын түсіндіру үшін калибрлеу қажет.



Жеке дозиметр

Жұмыскер жинаған операциялық дозаны тіркейді. Мысалы, терең доза эквиваленті $H_p(10)$.

Өндірістегі радиациялық қорғаныс

Қорғау шараларын жұмысты негіздеу, дозаны оңтайландыру және белгіленген шектерді сақтау қағидаларына сүйеніп таңдайды.

Қорғау деңгейі	Мысал	Нені бақылайды?
Инженерлік	Экрандалған камера, есік блоктауы, дабыл	Сәуле өрісін және аймаққа кіруді шектеу
Ұйымдастыру	Жұмыс тәртібі, жауапты тұлға, көздерді есепке алу	Көзге қол жеткізу мен жұмыс уақытын бақылау
Мониторинг	Аймақтық өлшеу және жеке дозиметрия	Қорғаныс шарасының тиімділігін өлшеммен тексеру

> Сыртқы әсерді азайтудың үш физикалық тәсілі — уақытты қысқарту, арақашықтықты ұлғайту және экрандау.

Қазақстандағы тиімді дозаның шектері

ҚР ДСМ-71 бұйрығы, 1-қосымша, 1-кесте. Көрсетілген шектер техногендік көздерді қалыпты пайдалану жағдайына қатысты.

Сәулеленетін топ	Бес жылдық орташа жылдық шек	Бір жылда ең жоғары
А тобының персоналы	20 мЗв/жыл	50 мЗв
Халық	1 мЗв/жыл	5 мЗв

Жылдық тиімді доза

Сыртқы сәулеленудің тиімді дозасы мен сол жылы ішке түскен радионуклидтерден күтілетін тиімді доза қосылады.

> Шекпен қатар дозаны оңтайландыру және тиісті жеке мониторинг қолданылады.

Бақылау сұрақтары:

1. Өнеркәсіптегі иондаушы сәулелер көздерін сипаттаңыз.
2. Сәулелену түрлерін жіктеңіз.
3. Сәулеленудің адам ағзасына әсерін бағалаңыз.
4. Сәулелену деңгейін өлшейтін дозиметрлік құралдарды сипаттаңыз.
5. Аймақтық бақылау мен жеке дозиметрияны салыстырыңыз.
6. Өндірістегі қорғаныс құралдары мен әдістерін талдаңыз.

Әдебиеттер:

1. Полуэктова В. А., Мухачева В. Д. Физико-химические методы анализа. Теория и практика: учебное пособие. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. — 200 с.
2. Шишмарёв В.Ю. Технические измерения и приборы. –М.: Академия, 2022. – 380с.
3. Инструментальные методы в химии / под ред. В. В. Лунина, А. К. Буряка. — М.: КУРС, 2024. — 360 с.