

Шифр : радіаційна безпека

Наукова студентська робота на тему:
«Моделювання екологічно безпечних напрямів у сфері поводження
з радіоактивними відходами»

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Розділ 1. Екологічна проблематика функціонування атомних електростанцій та поводження з радіоактивними відходами.....	5
1.1 Екологічна безпека атомних електростанцій та поводження радіоактивними відходами.....	5
1.2 Стала концепція розвитку Чорнобильської зони відчуження та досвід розвитку зон евакуації після аварії на АЕС «Фукусіма-1» (Японія).....	8
1.3 Огляд попередніх досліджень в сфері поводження з радіоактивними відходами.....	15
Розділ 2. Моделювання інноваційних кластерів у сфері утилізації радіоактивних відходів.....	20
2.1 Методика моделювання та теоретичних досліджень у сфері поводження з радіоактивними відходами.....	20
2.2 Теоретичне обґрунтування можливості утилізації рідких радіоактивних відходів в енергетичних цілях.....	22
2.3 Візуалізаційне моделювання тенденцій використання радіолізу і наночасток при поводженні з радіоактивними відходами.....	26
Висновки.....	29
Список використаних джерел.....	30
Додаток А.....	34
Додаток Б.....	41
Додаток В.....	50

Вступ

Впливи Чорнобильської та Фукусімської катастроф відзначаються значними масштабними та потребують розширення міжнародного співробітництва для знаходження екологічно безпечних шляхів розвитку атомної енергетики у світі. Обидві катастрофи призвели до загального погіршення стану здоров'я і благополуччя населення радіаційно забруднених територій. Розроблення нової концепції розвитку об'єктів атомного енергокомплексу як складної природно-техногенної системи з рециклінгом радіоактивних відходів є надзвичайно актуальним.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення техногенної безпеки експлуатації атомного енергокомплексу в сфері поводження з радіоактивними відходами за допомогою візуалізаційного моделювання інноваційних кластерів розвитку технологічних рішень екологічно безпечним чином. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- визначення екологічної проблематики утворення та управління радіоактивними відходами;
- порівняльний огляд перспективного планування нової екологічно безпечної концепції розвитку Чорнобильської зони відчуження зі станом розвитку зон евакуації після аварії на АЕС «Фукусіма-1» (Японія);
- формування інтегрованих методичних засад моделювання процесів рециклінгу радіоактивних відходів із використанням аналітичних інструментів та методів;
- теоретичне обґрунтування процесу реалізації радіолізу при виробництві водню з утилізацією рідких радіоактивних відходів;
- візуалізаційне моделювання тенденцій використання радіолізу і нанотехнологій для утилізації радіоактивних відходів.

Об'єкт дослідження – радіоактивні відходи.

Предмет дослідження – процес екологічно безпечної утилізації радіоактивних відходів для підвищення техногенної безпеки експлуатації атомного енергокомплексу.

Методи дослідження. У роботі застосовували бібліометричний аналіз з використанням аналітичних інструментів наукометричної бази даних Scopus, методи теоретичного аналізу механізмів радіолізу води та спеціальне програмне забезпечення VOSViewer v.1.6.15.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано концепцію інтегрованого застосування різних типів аналітичних інструментів для теоретичного дослідження та моделювання напрямів поведінки з радіоактивними відходами з отриманням інноваційних технологічних рішень.

Практичне значення одержаних результатів. Сформовано комплекс методичної підтримки теоретичних досліджень щодо розвитку сфери поведінки з радіоактивними відходами, що містить інтегровану систему аналітичних інструментів із візуалізаційною презентацією отриманих результатів за допомогою існуючих у вільному доступі програмних продуктів.

Апробація результатів наукової роботи. Основні наукові та практичні результати роботи доповідалися і обговорювалися на VII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, квітень 2020 р.); Міжнародній науковій конференції «Розвиток наукової думки постіндустріального суспільства: сучасний дискурс» (м. Миколаїв, листопад 2020 р.) (Додаток А).

Також за результати дослідження була опублікована стаття (Додаток Б) у фаховому виданні, що індексується міжнародними наукометричними базами, у співавторстві із зарубіжним вченим з Університету Тюбу (Chubu University) (Японія), що дозволило поглибити міжнародне співробітництво для розроблення спільної проектно-науково-дослідних пропозиції у межах грантової програми Японського товариства розвитку науки (Додаток В).

Розділ 1 Екологічна проблематика функціонування атомних електростанцій та поводження з радіоактивними відходами

1.1 Екологічна безпека атомних електростанцій та поводження радіоактивними відходами

Основними джерелами радіоактивних відходів в Україні є атомні електростанції, підприємства з видобування та переробки уранової руди, наукові центри, підприємства та організації, що використовують радіоактивні речовини або джерела іонізуючого випромінювання. Частка радіоактивних відходів, що утворилися внаслідок аварії на Чорнобильській атомній електростанції сягає 95 % всіх радіоактивних відходів в Україні.

Україна входить в 10-ку країн, за кількістю діючих енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). Такі радіоактивні відходи утворюються на атомних електростанціях [1]:

- відходи, що утворюються після проведення ремонтів або заміни обладнання, проведення різних випробовувань;
- продукти нейтронної активації, що утворюються поза тепловиділяючими елементами;
- продукти поділу, що попадають з тепловиділяючих елементів в теплоносії, певна частина яких періодично або безперервно виводиться з реактора;
- протікання теплоносія основного контуру реакторної установки внаслідок виникнення дефектів у трубопроводах;
- газоподібні та радіоактивні аерозольні викиди, пов'язані з випаровуванням теплоносія внаслідок порушення цілісності оболонок, газоподібні продукти поділу через мікро тріщини просочуються в теплоносій, воду першого контуру, кладку реактора (особливо в випадках руйнування тепловиділяючих елементів);

– відходи після очистки води в різних технологічних системах реакторів;

– обладнання, матеріали, використані фільтри, радіоактивно забруднене сміття, спец одяг тощо.

Обсяг щорічного винесення за межі Чорнобильської зони відчуження цих радіонуклідів становить приблизно $(0,5-3) \times 10^{-3}$ відсотків запасів у природних екосистемах і $(1-7) \times 10^{-7}$ відсотків запасів природно-техногенного комплексу (включаючи об'єкт «Укриття»). Міграція розчинених радіонуклідів є рідким стоком. Поверхневі води переносять значну кількість зважених часток, що представлені, в основному, тонкодисперсними мулуватими частками, які вміщують значну кількість радіонуклідів в поглинутому стані. Рідкий і твердий стік радіонуклідів досягають кількох відсотків на рік від запасів на басейні водозбору. Міграція радіонуклідів до рівня ґрунтових вод супроводжується послідовним виносом їх з дренажним стоком (при наявності горизонтального дренажу) в річкові системи. Порівняно висока міграційна активність ^{90}Sr [2]. Цей радіонуклід може знаходитись розчиненим у катіонній, аніонній та нейтральній формах, що дозволяє йому долати геохімічні бар'єри і досягати навіть глибоких ґрунтових і підземних вод.

Отже, відзначається актуальністю розроблення інтегрованих рішень поводження з радіоактивними відходами та реалізації проєктів екологічно безпечного розвитку зони відчуження.

Найпоширенішими методами перероблення радіоактивними відходами (РАВ) у країнах з розвинутою атомною енергетикою (з огляду на вимоги безпеки) є такі [3]:

1. пресування твердих радіоактивних відходів (ТРВ) гідравлічними пресами високого тиску (зусилля 15-20 тис. тонн). Для такої переробки придатні металева стружка, термоізоляційні матеріали, негорюче обплетення електрокабелів тощо. Це дає змогу зменшити початковий об'єм, залежно від

типу рідких радіоактивних відходів (РАВ), до 5 разів. Спресовані ТРВ можуть у подальшому бути іммобілізовані та направлені на захоронення;

2. спалювання горючих ТРВ та РРВ. Спалюванню підлягають відходи органічного походження та інші горючі РАВ. Метою спалювання є переведення РАВ у інертний стан (зольний залишок), що поліпшує умови безпеки тимчасового зберігання та подальшого захоронення, а також значно зменшує початковий об'єм РАВ (до 50 разів). Як правило, зольний залишок направляється на пресування та іммобілізацію. Частіше за все, з огляду на фінансові та технологічні чинники, як іммобілізуюча субстанція використовується цементний розчин;

3. переведення РРВ у твердий стан включенням їх в іммобілізуючу матрицю. Для отримання кінцевого продукту цементування із заданими радіологічними та фізико-хімічними характеристиками, РРВ (кубовий залишок, іонообмінні смоли, перлітно-навивні фільтри) змішують у певних пропорціях з цементним розчином та спеціальними добавками. Після затвердіння отриманий компаунд може направлятися на тимчасове зберігання чи захоронення.

Іншим досить розповсюдженим методом переведення кубового залишку (КЗ) у твердий стан є бітумування. У цьому разі КЗ випаровується до сухого залишку (порошкоподібна субстанція) при високій температурі на стінках бітуматора та змішується з розплавленою бітумною масою. Окремі характеристики бітумного компаунду, зокрема стійкість до вилуговування радіонуклідів, вищі, ніж характеристики цементного компаунду, але цементування з погляду технологічності та економічних затрат більш прийнятне [4].

1.2 Стала концепція розвитку Чорнобильської зони відчуження та досвід розвитку зон евакуації після аварії на АЕС «Фукусіма-1» (Японія)

Впливи Чорнобильської і Фукусімської катастроф є масштабними. Обидві катастрофи призвели до загального погіршення стану здоров'я і благополуччя населення. Через відкладену у часі (латенту) специфіку розвитку онкозахворювань та у зв'язку з тим, що з моменту аварії на АЕС «Фукусіма-1» минуло лише десять років, сьогодні досі не визначена чітка прогностична функція щодо впливу її на динаміку захворюваності на конкретні види раку та інші хвороби, пов'язані з цією аварією. Але було встановлено очевидне збільшення випадків захворювання на рак щитовидної залози, що підтверджено науковими даними [5].

Радіаційний стан навколишнього середовища в Чорнобильській зоні відчуження істотно змінився в порівнянні з першим після аварійний роком. Нині, після розпаду коротко існуючих радіонуклідів, основні дозові навантаження на людей і ландшафт формуються за рахунок цезію-137, стронцію-90, трансуранових елементів.

Чорнобильський біосферний заповідник було створено від 26 квітня 2016 року Указом Президента України. Заповідник розташований в Іванківському і Поліському районах Київської області в межах зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи [6].

Площа заповідника становить 227 тисяч гектарів, що займає 2/3 території від усієї Чорнобильської зони відчуження. Такі заповідники поширені у світі, наприклад, у Білорусі та на Уралі. Для України він є унікальним та найбільшим у країні. На його території є велике різноманіття: 23 наземних і 7 водних фітосистем, 5 різних видів ландшафтів, 303 види хребетних, 1256 видів вищих рослин, 120 видів лишайників та 200 видів мохів [7].

Основні завдання Заповідника зображені на рисунку 1.1 відповідно до наших попередніх досліджень [8].

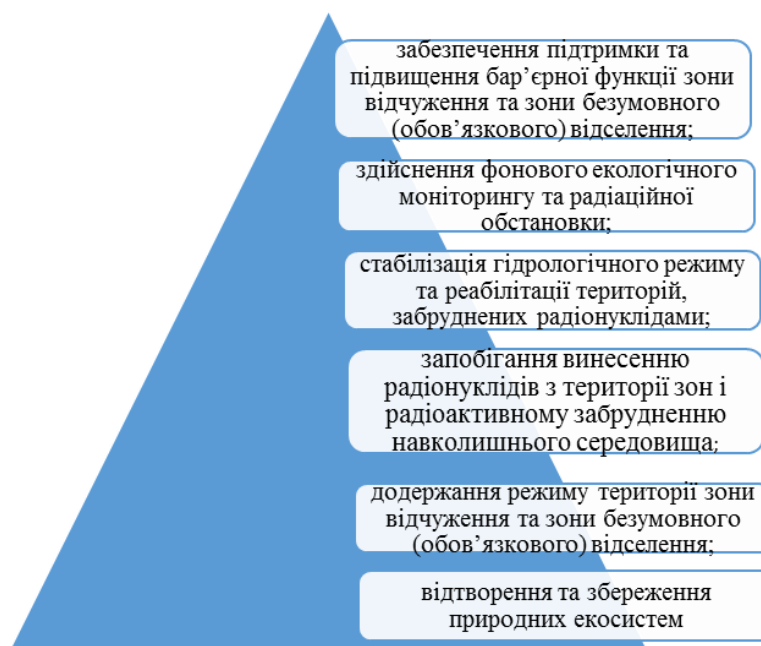


Рисунок 1.1 – Блок-схема основних завдань створення Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника

Специфічною особливістю забезпечення ефективного менеджменту екомережі в межах Чорнобильського біосферного заповідника має стати радіаційна безпека, зменшення ризиків пожеж, перенесення і міграції радіонуклідів на прилеглі території [9]. Механізмом для оптимального та ефективного збереження ландшафтів, які є забрудненими, та мінімізацію загроз перенесення радіонуклідів є транскордонне співробітництво у контексті Поліської екологічної конвенції та Пан'європейської екомережі, яку потрібно обґрунтувати і ратифікувати між Білоруссю, Польщею, Росією та Україною.

За даними Державного агентства України з управління зоною відчуження першочерговим завданням є зміна статусу Чорнобильського біосферного заповідника з установи державного значення на спеціалізоване державне підприємство. Адже на сьогодні існують певні розбіжності у законодавстві щодо функцій Державного агентства України з управління зоною відчуження та

Державної служби України з надзвичайних ситуацій, і відповідно у фінансуванні цих структур під час виникнення пожеж у Чорнобильській зоні. До причин тривалості лісових пожеж та їх безпосереднього виникнення можна віднести, зокрема, ліквідацію ключових галузевих лісопожежних установ, відсутність державного фінансування охорони лісів від пожеж та відсутність системних антипожежних досліджень в Україні тощо.

Відповідно до основних пріоритетних напрямів розвитку Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) була сформована модель, що наведена на рисунку 1.2 [8].

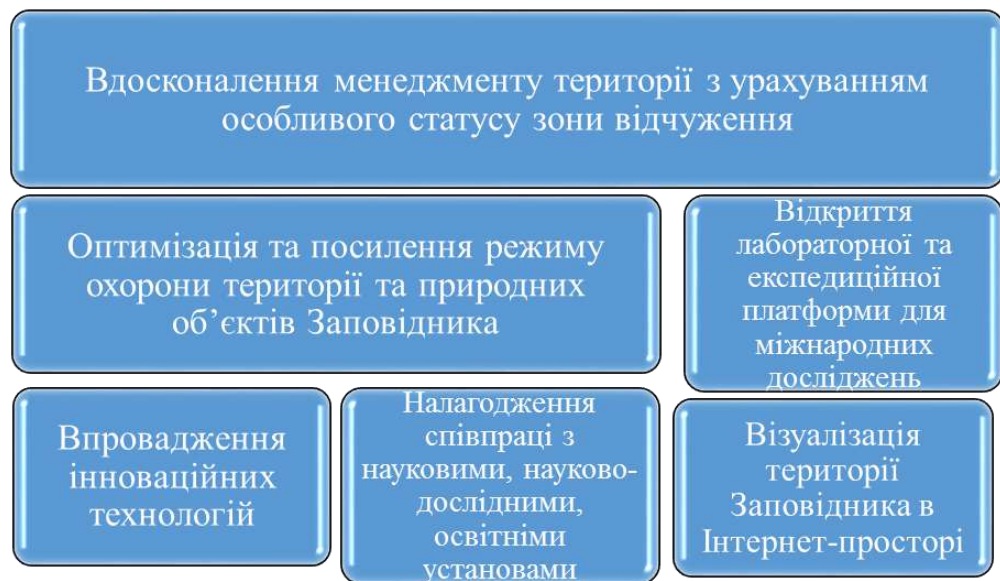


Рисунок 1.2 – Інтегрована модель стратегії стійкого розвитку Чорнобильського біосферного заповідника

Для забезпечення контролю за пересуванням людей у зоні відчуження, може стати ефективним запровадження єдиної системи «Розумне місто», яка буде використовувати системи GPS та створення єдиного диспетчерського центру [5].

Аварія на АЕС «Фукусіма-1» – велика радіаційна аварія максимального, 7-го рівня за Міжнародною шкалою ядерних подій (INES), що почалася 11 березня 2011 року в результаті найсильнішого сильного в історії Японії

землетрусу і цунамі [10]. Роботи з відновлення АЕС та усунення наслідків тривали майже місяць. За цей час в море було скинуто приблизно 10 000 тонн радіоактивно зараженої води, яка слугувала для охолодження реакторів. 11 квітня відбувся ще один землетрус, цього разу силою у 7 балів. За півроку усю забруднену воду відкачали та полагодили системи охолодження реакторів. Утім, на цьому ліквідація аварії не завершилася [11]. Видалення забрудненої води з будинків реактора і турбін стало основним завданням на третьому тижні, поряд із забрудненою водою в траншеях, які прокладають кабелі і трубопроводи. Це було пов'язано як із затопленням внаслідок цунамі, так і з витоком з реакторів. Сток з майданчика в море також містив радіонукліди, що значно перевищують допустимі рівні. Поступово було створено близько 1000 резервуарів-сховищ, в тому числі спочатку 350 сталевих резервуарів з гумовими швами, кожен з яких вмщав 1200 м³. Компанія Терсо побудувала нову установку очищення стічних вод для очищення радіаційно забрудненої води. При цьому була використана як запатентована в США адсорбційна технологія, так і французькі традиційні технології на новій очисній станції продуктивністю 1200 м³ / добу. Ці установки скорочують обсяг цезію з приблизно 55 МБк / л до 5,5 кБк / л. [12]. Для того, щоб стабілізувати ситуацію на Фукусімській АЕС, необхідно провести вилучення ядерного палива з реакторів. Це японські фахівці запланували зробити у 2021 році.

Впродовж перших днів аварії з прилеглих територій, які були уражені радіоактивним забрудненням, довелося евакуювати близько 170 тисяч жителів. В 11 муніципалітетах, за винятком «зони важкозворотньої», в 9 (в усіх, окрім міста Футаба і міста Окума), розпорядження про евакуацію були скасовані станом на 1 квітня 2017 роки після дезактивації радіоактивних матеріалів і ремедіації. При цьому була впроваджена інфраструктура, що зображена на рисунку 1.3. В результаті, число біженців з евакуйованих районів близько 24000 (близько 1 % населення префектури Фукусіма), а площа, що підлягає евакуації, склала близько 370 км² (близько 3 %) [13].



Рисунок 1.3 – Стан зон ядерної евакуації станом (Kawasaki, 2021) [13]

Слід зазначити, що 19 квітня 2011 р. Міністерство освіти, культури, спорту, науки і технологій Японії визначило 13 початкових шкіл, зокрема початкову школу Томінарі в місті Даті, школами з високими дозами радіації, які повинні були обмежити заняття на свіжому повітрі у зв'язку з наслідками аварії на АЕС «Фукусіма-1». Приблизно через 1 тиждень муніципальна влада вжила заходів з видалення верхнього шару ґрунту з території школи, і заборона на прогулянки на свіжому повітрі в початковій школі Томінарі була знята. Співробітники школи продовжили роботу щодо дезактивації прилеглої території з використанням миючих апаратів високого тиску. Були досягнуті певні позитивні результати, але необхідне було застосування більш ефективного методу дезактивації. У липні 2011 року муніципальна влада приступили до реалізації проєкту щодо відновлення навколишнього середовища, як в будівлях школи, так і за їх межами. У проєкті взяли участь дослідники та фахівці з дезактивації, члени Асоціації батьків і вчителів, місцеві спільноти, а також волонтери, які використовували різні спеціалізовані форми дезактивації. Асфальтові поверхні та невеликі отвори в конструкціях, що

поглинали радіаційне випромінювання, були дезактивовані методом піскоструминного оброблення (рис. 1.4а). Цей метод передбачає зачищення ділянки дрібнозернистим абразивним матеріалом з піску, який потім розпорошується за допомогою обладнання із встановленими фільтрами. Якщо на поверхні дезактивованій були тріщини та була рослинність, то її віддаляли, а тріщини заповнювалися асфальтом. Пластмасові вироби, такі як обладнання дитячих майданчиків, очищалися за допомогою хімічних реагентів. Рослини були зрізані зі схилів, а коріння вилучені шляхом вискоблювання. Посаджені ділянки були підрізані за допомогою електричних фрезаків, оснащених мішками для пилюси (рис. 1.4б). У результаті початкова школа змогла відновити уроки плавання в кінці першого семестру [14].



а)

б)

Рисунок 1.4 – Дезактивація прилеглих до школи територій (м.Даті, Японія): а) метод піскоструменого оброблення ($8 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1} \rightarrow <0.7 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$); б) електричний фрезерний метод ($3,5 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1} \rightarrow <0,7 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$) (Katsumi, 2016) [14]

У лютому 2014 року було опубліковано результати дослідження, згідно з якими 458 жителів двох обстежених районів, розташованих у 20–30 км від АЕС, і третього – в 50 км на північний захід від забрудненої території отримали дози опромінення, аналогічні природним фоновим рівням в країні.

Вимірювання проводилося за допомогою персональних дозиметрів протягом серпня-вересня 2012 року [12]. Територія довкола АЕС «Фукусіми-1» не стала зоною відчуження та не має туристичних локацій, що на сьогодні розвиваються у ЧЗВ.

Напрямок впровадження інноваційних технологічних рішень, на наш погляд, зокрема стосується системи управління радіоактивними відходами. Відповідно подальші дослідження будуть направлені на оптимізацію технічних рішень енергетичного використання рідких радіоактивних відходів, фіксації радіонуклідів у матричних структурах та визначення синергетичних закономірностей детоксикації ґрунту, як чинника біопродуктивності екосистеми, за допомогою модифікованих біокомпозитів різного генезису.

План розвитку ЧЗВ полягає в реабілітації радіаційно забруднених територій, повторного визначення територіального статусу ЧЗВ та видачі дозволів на повернення населення в незабруднені райони. Нова концепція передбачає розподіл ЧЗВ на окремі сектори [2]:

1) планується, що промислова зона буде створена на найбільш забруднених територіях, де розміщена Чорнобильська атомна електростанція, установки для переробки та основні пункти зберігання радіоактивних відходів. Передбачається, що основна промислова діяльність буде виконуватися саме тут, в особливості роботи з будівництва нового безпечного конфайнмента (НБК);

2) розглядається можливість перетворення санітарно-захисної зони в буферну зону між промисловою зоною і територією природного заповідника;

3) заповідні зони передбачається розмістити там, де будуть заборонені промислова та інша діяльність людини з метою збереження основних природних ландшафтів і біологічного різноманіття регіону.

Очікується, що реабілітація ЧЗВ створить оптимальні умови для розвитку промислової діяльності і охорони навколишнього середовища протягом тривалого часу; наприклад, очікується, що новий безпечний

конфайнмент буде перебувати в експлуатації мінімум протягом 100 років. Різні типи пунктів зберігання радіоактивних відходів повинні забезпечити безпеку зберігання протягом 300 і більше років. Можливо, що на цій території розпочнеться будівництво основного геологічного сховища радіоактивних відходів. Можна також створити національний інженерно-технічний центр для переробки всіх типів радіоактивних матеріалів і відходів, які будуть доставлятися в геологічне сховище з різних частин України.

1.3 Огляд попередніх досліджень в сфері поводження з радіоактивними відходами

За статистичними даними щодо тематики поводження з радіоактивними відходами згідно бази даних (БД) Scopus, визначено тенденцію зростання публікаційної активності з піковими значеннями, що припадають на роки аварій з витоком радіонуклідів (рис. 1.5). Так, пік дослідницької діяльності припадає на 2011 рік. Але поступовий ріст спостерігається з 1983 року з першим значним зростанням у 1986 році.

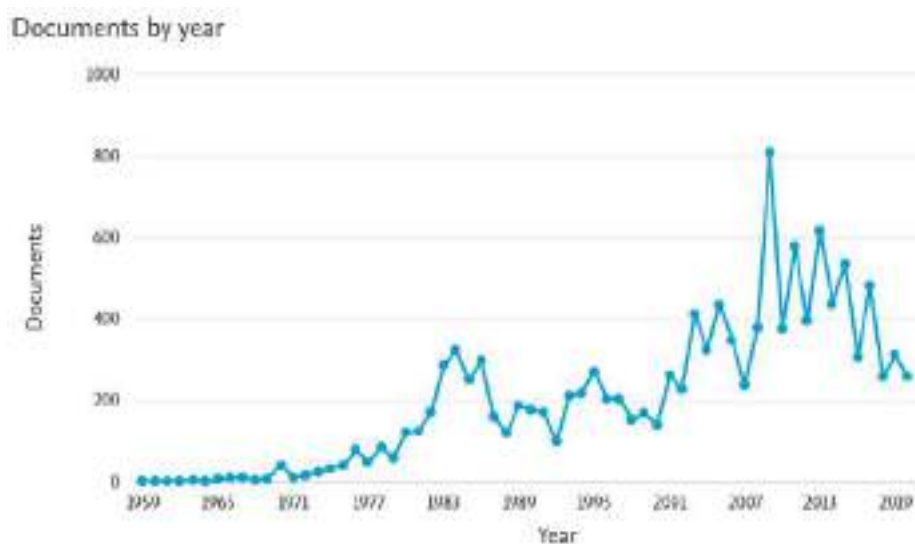


Рисунок 1.5 – Діаграма публікаційної активності за роками відповідно до даних БД Scopus

Проведемо аналіз публікаційної активності за країнами (рис. 1.6). Найбільшу кількість публікацій було зроблено вченими США (3250 публікацій) та Великобританії (понад 1000 публікацій), а також країн Західної Європи та Азії (Японія та Китай), що свідчить про значну зацікавленість розвинутих країн в сфері поводження з радіоактивними відходами.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

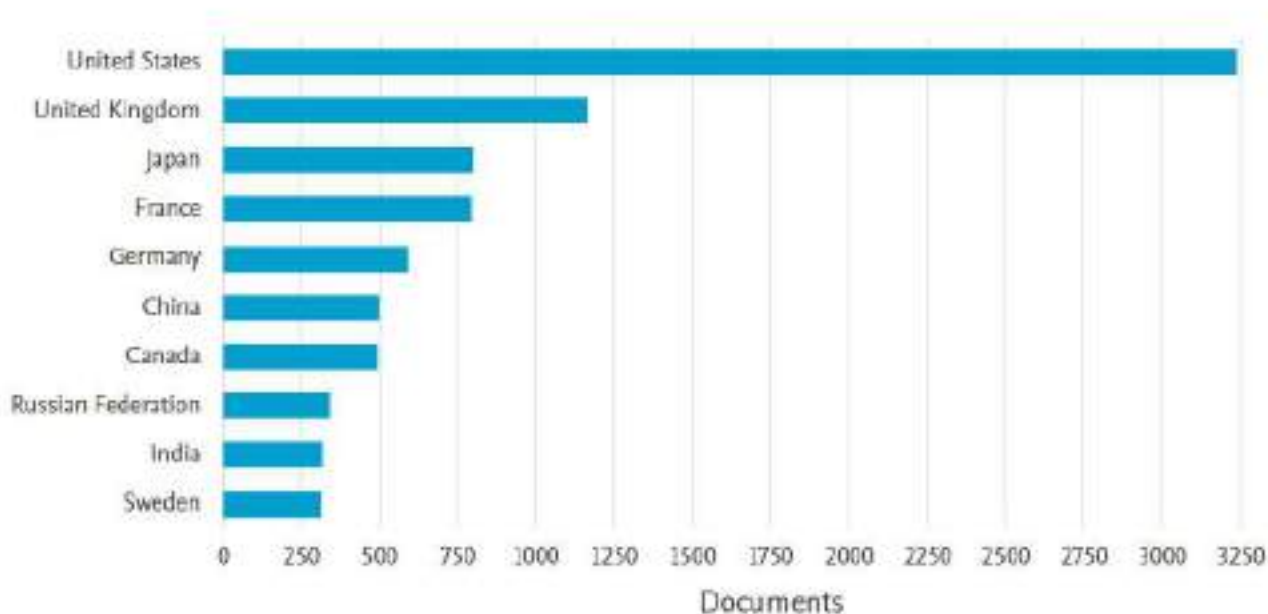


Рисунок 1.6 – Діаграма розподілу публікацій за країнами щодо досліджень у сфері поводження з радіоактивними відходами за БД Scopus

Необхідно зазначити, що сфера реалізації досліджень досить широка (рис. 1.7) і стосується не тільки інженерних напрямів удосконалення обладнання [15], а також оцінювання впливу радіаційного забруднення на компоненти екосистеми та розвитку енергетичного потенціалу атомних електростанцій [16,17].

Відповідно до офіційних даних Державного агентства управління зоною відчуження [18] за обсягами радіоактивних відходів (РАВ) Україна знаходиться на II місці у Європі та на IV в світі (3,5 млн м³).

Радіоактивні відходи, що містять короткоживучі радіонукліди, національним законодавством дозволяється захоронити у поверхневих і при поверхневих спорудах. Всі інші радіоактивні відходи допускається захоронити тільки в сховищах геологічного типу, після переведення їх у твердий стан вибухо-, пожежо- і ядерно безпечні форми. Отже, до створення подібної споруди, на це потрібно буде кілька десятиліть, подібні відходи повинні зберігатися у відповідних безпечних умовах.

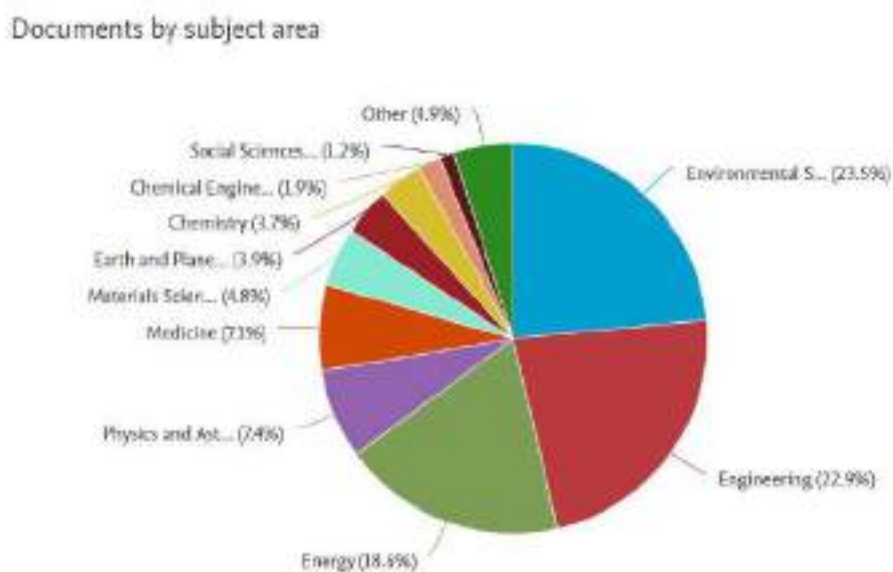


Рисунок 1.7 – Діаграма документів за галузями використання за БД Scopus

Основні вимоги зі забезпечення безпеки сховищ радіоактивних відходів регулюються нормативними документами, вони встановлюють процедури, умови і критерії ліцензування, вибору і затвердження площадки для будівництва, проектування, будівництва, експлуатації, закриття і зняття з експлуатації, забезпечення якості, проведенні радіаційного контролю і моніторингу навколишнього середовища.

Роботи з локалізації та дезактивації виконуються у зоні відчуження Державним спеціалізованим підприємством «Комплекс», а за її межами Централізованою службою експлуатації пунктів локалізації РАВ та відходів дезактивації, що утворені при Київському державному міжобласному спецкомбінаті УкрДО «Радон» [19].

Розділ 2 Моделювання кластерів інновацій у сфері утилізації радіоактивних відходів

2.1 Методика моделювання та теоретичних досліджень у сфері поводження з радіоактивними відходами

Для моделювання використовувалися дані про публікаційну діяльність з наукометричної бази даних Scopus.

Правильне використання індексів цитування та бібліометрія необхідно для таких завдань [20]:

1. знайти адекватну інформацію за темою дослідження з можливістю її детального аналізу за авторами, організаціями, країнами тощо;
2. проаналізувати актуальні напрямки досліджень і взаємозв'язки між ними;
3. отримати підтверджуючих об'єктивних даних для оцінки результатів досліджень.

Бібліометричний аналіз наукометричних баз даних дозволяє [21]:

- здійснити аналіз незалежно від власних уявлень про важливість проблеми і ступеня її висвітлення в ЗМІ;
- отримати реальні дані про кількість наукових публікацій з конкретного питання, про джерела цієї інформації і про публікації, найбільш повно висвітлюють її, про авторів (їх видавничої діяльності), оцінку статей науковим співтовариством (по бібліометрії) і, в кінцевому підсумку, на основі всіх перерахованих вище факторів, сформуванню власної професійної думки про найбільш значущих і освітлених вченими екологічні проблематики радіаційного забруднення та поводження з радіоактивними відходами.

Сукупність публікацій за бібліометричним аналізом в базі даних Scopus формується на основі спеціалізованих запитів по набору ключових слів, що відносяться до досліджуваної сфери. Далі на основі наборів ключових слів,

зазначених для сфери дослідження, формується емпірична база даних досліджень. Так, було формовано комплекс методичної підтримки теоретичних досліджень, що зображено на рисунку 2.1, що містить інтегровану систему аналітичних інструментів з візуалізаційною презентацією отриманих результатів за допомогою існуючих у вільному доступі програмних продуктів.

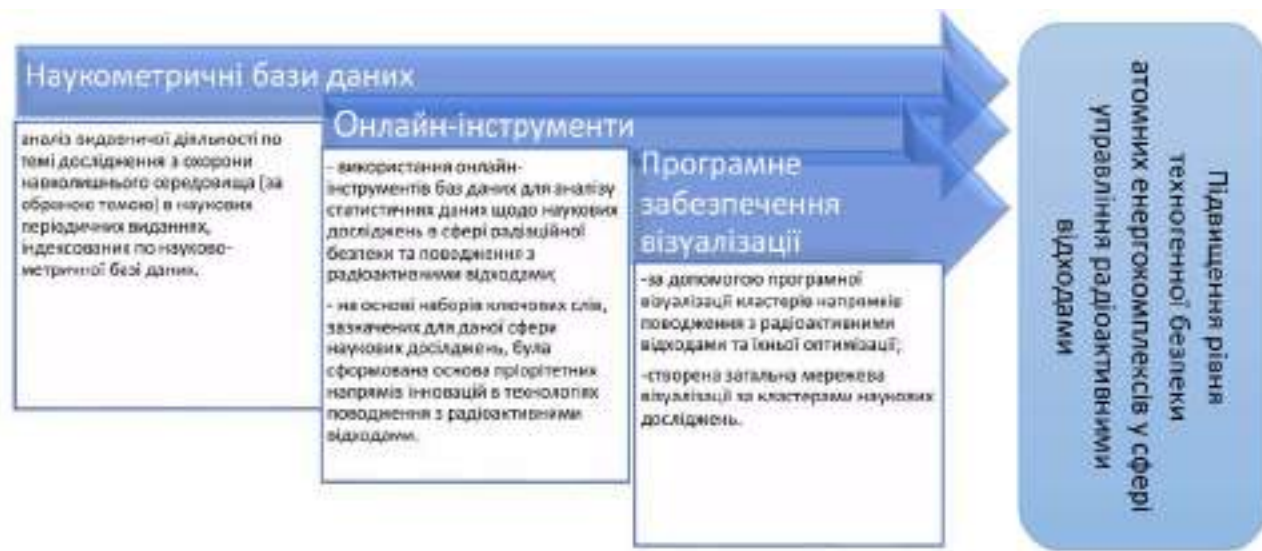


Рисунок 2.1 – Система взаємозв’язків методів досліджень для реалізації інтегрованого підходу удосконалення існуючих та створення інноваційних рішень поводження з радіоактивними відходами

Використано програмний продукт VOSviewer для візуалізації кластерів. Під час формування загальної мережевої карти візуалізації за замовчуванням програма виділяє кілька великих зон (кластерів), в яких за взаємозв’язками ключових слів відокремлюють сфери досліджень. Накладна візуалізація була обрана як більш ефективний інструмент для перевірки останніх тенденцій в дослідженнях у часовому масштабі. Розмір кіл відповідає переважанню термінів при публікації досліджень за певним напрямом. Розподіл кольорів залежить від року публікації (у середньому для кожного кластера), останні – жовтого кольору. Основні ядра кластерів визначаються часом їх сфер перетину один з одним.

2.2 Теоретичне обґрунтування можливості утилізації рідких радіоактивних відходів в енергетичних цілях

Переробка відпрацьованого (опроміненого) ядерного палива (ВЯП) дає деякі економічні вигоди, відновлюючи невикористаний уран і залучаючи в енергетику напрацьований плутоній. При цьому зменшується обсяг високорадіоактивних і небезпечних відходів, які необхідно належним чином зберігати. В ВЯП міститься приблизно 1% Pu. Це якісне ядерне паливо, яке не потребує ні в якому процесі збагачення, воно може бути змішане з збідненим ураном і поставлятися у вигляді свіжих паливних збірок для завантаження в реактори. Його можна використовувати для завантаження і в реактори на швидких нейтронах.

Тому існують проекти з розробки щільного палива, що поєднуються з промисловим освоєнням і впровадженням змішаного оксидного палива.

Для виробництва МОКС-палива розроблено безліч методів [22]: механічне змішування і спільний розмел порошоків PuO_2 і UO_2 ; золь-гель технологія; гранулювання осадів гідроксидів; амоній-карбонатне со-осадження; плазмохімічна конверсія; піроелектрохімічний процес отримання гранульованого змішаного діоксиду (твердого розчину) з подальшим вібропакуванням в оболонці ТВЕЛів та ін.

За даними Державного агентства України з управління зоною відчуження, на майданчику виведеної з експлуатації Чорнобильської АЕС в Київській області запущена установка з переробки рідких радіоактивних відходів. За словами фахівців Чорнобильської АЕС, рідкі відходи переробляються в кілька етапів, в результаті чого вони тверднуть у вигляді цементного розчину, який є більш безпечною формою зберігання та захоронення радіоактивних відходів [23]. Але ситуація з переробкою і похованням радіоактивних відходів, в тому числі рідкої фази, не вирішена, залишається багато питань, що стосуються екологічної безпеки процесів і технологічної реалізації найбільш

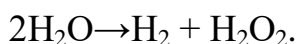
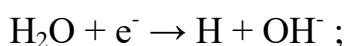
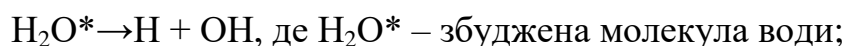
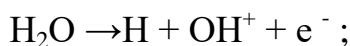
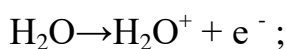
енергоефективних рішень. У зв'язку з цим актуальним є можливість використання радіолізу води і нових матричних наноматеріалів для поводження з радіоактивними відходами.

Останнім часом в ядерних реакторах з водяним охолодженням як джерело молекулярного водню розглядаються процеси радіолізу в воді (в рідкому і пароподібному станах), а також реакція пар-метал. Радіолітичного процесу накопичення водню в реакторах характеризуються виділенням молекулярного водню. Вони спостерігалися при гомогенному радіолізі води, який не брав до уваги впливу радіаційних та радіаційно-термічних процесів конструкційних матеріалів при контакті з водою на накопичення молекулярного водню [24].

Відповідно до прийнятої технології на АЕС після того, як паливо досягне регламентного вигорання тепловиділяючі збірки (ТВЗ) вивантажуються з активної зони. Вони занадто «гарячі», щоб їх можна було негайно ж вивозити зі станції. Тому їх «ставлять на витримку» безпосередньо на АЕС. Для цієї мети близько реактора є спеціальні басейни різної конструкції. У цих басейнах, залитих водою, ТВЗ поміщаються на стелажі або в спеціальні пенали і зберігаються досить тривалий час – від 3 до 8 років (і більше).

Вода в басейнах-сховищах грає одночасно три ролі: біологічного захисту, нейтронного захисту і теплоносія.

Під дією іонізуючого випромінювання відбувається розкладання води (радіоліз) за участю наступних реакцій [25]:



Отже, в опроміненій воді одночасно утворюються іони H^+ , OH^+ , OH^- , атоми водню і вільні радикали OH . Це надзвичайно активні в хімічному

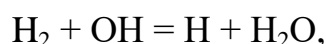
відношенні агенти, що підвищують хімічну активність води.

Утворення у воді водню і перекису водню залежить і від наявності у воді розчинених газів. Надлишок водню у воді зменшує швидкість радіолізу. Надлишок у воді кисню знижує концентрацію водню внаслідок синтезу води.

Дослідження щодо джерел радіолітичного водню проводились в [26]. Залежно від дисперсності відпрацьованого ядерного матеріалу, концентрації розчинних форм радіонуклідів, ступеня вологонаповнення паливовміщуючих матеріалів та якості води у роботі [26] здійснено розрахунок швидкості виходу водню.

При радіолізі води, що знаходиться у відкритих ємностях та насиченою повітрям і без будь-яких активних акцепторів радикалів ОН в помітних концентраціях, спостережуваний вихід водню зазвичай дорівнює 0,1–0,2 молекула/100 еВ, тобто помітно менше початкового виходу водню.

Це обумовлено тим, що має місце реакція:



що ефективно руйнує молекулярний водень, що утворюється в результаті дії іонізуючого випромінювання.

Ця реакція конкурує з процесом видалення водню шляхом дифузії з рідкої фази в газову над поверхнею води. В процесі радіолізу води істотне значення мають розчинені в ній домішки, здатні взаємодіяти з іонами H^+ і OH^- . Так, іони Cl^- , Br^- , I^- , Cu^{2+} навіть при малих концентраціях помітно підсилюють розкладання води [25].

У зв'язку зі зберіганням відпрацьованого палива в басейнах виникають дві проблеми, обумовлені дією випромінювання на воду: утворення водню і, отже, проблема запобігання можливого вибуху суміші водню і кисню; інтенсифікації корозії обладнання басейнів-сховищ під дією випромінювання.

Вода в басейнах постійно піддається спеціальному очищенню. При цьому головна увага звертається на видалення з неї радіоактивних забруднень, що з'являються через негерметичність відпрацьованих ТВЗ. Але воду очищають на

іоннообмінних колонах також і від іонів металів - компонентів конструкційних матеріалів, головним чином сталей (хром, нікель, залізо).

Таким чином, дослідження в сфері застосування радіолізу води в зв'язку з проблематикою утилізації радіоактивних відходів та використання мінеральних систем з різною сорбційною здатністю для збільшення виходу водню є перспективним технологічним рішенням, що потребує подальшого розроблення та впровадження, для чого разом із вченими Університету Тюбу (Японія) було сформовано проєктну пропозицію у межах поглиблення міжнародного співробітництва в сфері поводження з радіоактивними відходами (Додаток В).

Важлива технічна реалізація процесу, така як:

- розроблення методів підвищення рівномірності поглинання енергії іонізуючих випромінювань;
- збільшити глибину проникнення низькоенергетичних електронів в опромінюється систему;
- забезпечити турбулентність опромінюється обсягу води, ефективно насичувати рідку фазу газом;
- регенерація летючих компонентів забруднень;
- створення замкнутої системи циркуляції на водоочисних спорудах;
- створення дослідних установок для реалізації комбінованих радіаційних методів для забрудненої води.

На наш погляд, розроблення нових матричних матеріалів в поєднанні з наночастинками для агрегації і концентрації радіонуклідів є перспективним методом вдосконалення радіолізу при виробництві водню з рідких радіоактивних відходів. Відповідно в подальшому потребують дослідження використання комбінованих полімінеральних композитів і наночастинок для інтенсифікації процесу виділення водню при радіолізі забруднених рідин; вивчення напрямків фіксації радіонуклідів у матричному матеріалі різного генезису. Це можливо у рамках розвитку інтегрованого підходу щодо комплексної детоксикації компонентів екосистеми.

2.3 Візуалізаційне моделювання тенденцій використання радіолізу і наночастинок при поводженні з радіоактивними відходами

На рисунках 2.2 і 2.3 представлена візуалізація за кластерами сучасних тенденцій в сфері використання наночастинок для концентрування радіонуклідів.

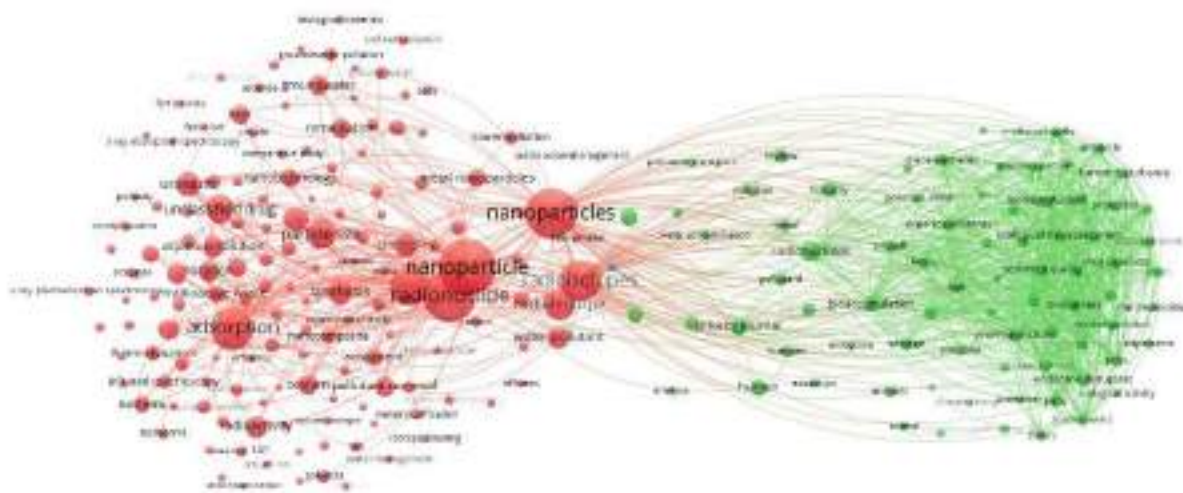


Рисунок 2.2 – Загальна мережева візуалізація при використанні наночастинок в галузі поводження з радіоактивними відходами (побудована за допомогою VOSViewer v.1.6.15): 3 кластери, 12454 links, 35267 total link strength

Відповідно було виділено два основні кластери: «червоний» кластер – реалізація досліджень у сфері сорбції радіонуклідів з використанням наночастинок різного генезису та структури, що досліджено в роботах [27,28]; «зелений» кластер – визначає дослідження напрямів надходження радіонуклідів до екосистеми, цей кластер пов'язаний з оцінкою еколого-економічних ризиків радіоактивного забруднення, процесів біонакопичення в екосистемі і впливу на організм людини (застосування лікарських засобів), при цьому розглядається можливість застосування нанотехнологій для зниження цих впливів у таких роботах як [29, 30]. Виділяється також «блакитний» кластер, але він все ще знаходиться в стадії формування у сфері впливу «червоного» кластера.

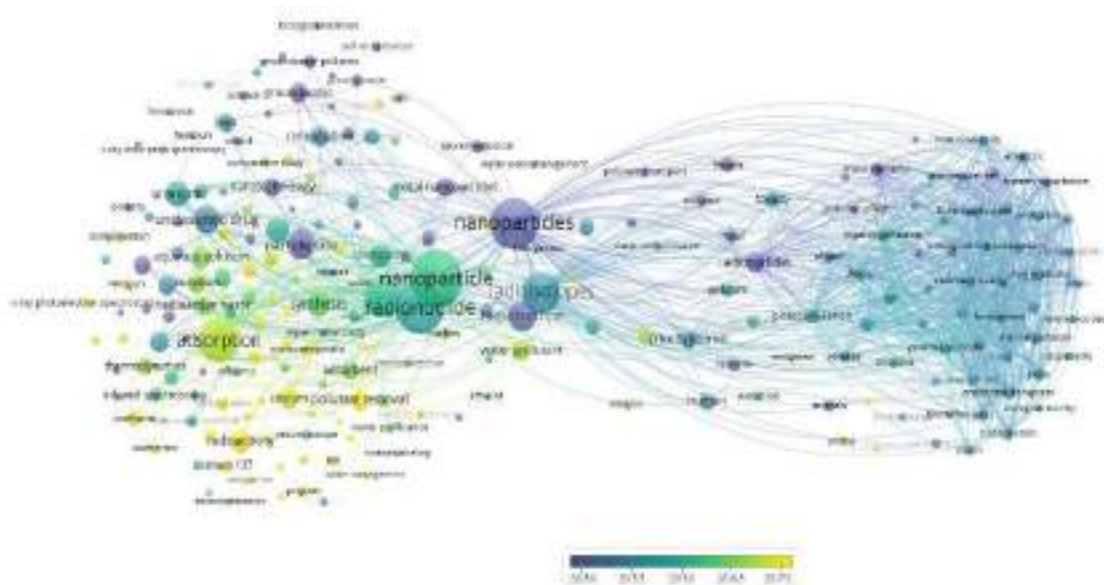


Рисунок 2.3 – Накладна візуалізація найбільш часто зустрічаються термінів при використанні наночастинок в галузі поводження з радіоактивними відходами (побудована за допомогою VOSViewer v.1.6.15), де масштабом вибірки є час з моменту публікації

Взаємозв'язок, що сформувався між кластерами, дозволяє припустити, що сфера застосування радіолізу води розширюється. Хоча загальне поводження з радіоактивними відходами в значній мірі орієнтоване на зв'язування рідких відходів в матричних структурах різного характеру для довгострокового поховання [31].

На рисунку 2.4 показані кластери, які були сформовані з використанням VOSviewer, а саме: «червоний» кластер, що охоплює дослідження процесів сорбції радіонуклідів і їх концентрації для радіолізу рідких середовищ; «зелений» кластер стосується чинників впливу на радіоліз води при виробництві водню; «жовтий» кластер охоплює дослідження природних процесів, пов'язаних з радіолізом; «синій» кластер пов'язаний з математичним моделюванням процесу радіолізу з виробництвом енергії, а «фіолетовий» – з процесами поводження з радіоактивними відходами та їх захороненням, а також із застосуванням радіолізу для цих цілей.

Висновки

1. На сьогодні проблематика поводження із радіоактивними відходами, зокрема рідкої фази, не вирішена, залишається багато питань, що стосуються екологічної безпеки процесів і технологічного впровадження найбільш енергоефективних рішень. Напрямки виносу радіонуклідів із ландшафтної системи визначаються ґрунтовими, геоморфологічними і гідрогеологічними умовами, що впливають на величину, спрямованість поверхневого, а також внутрішньо ґрунтового стоків.

2. Розглянуто перспективне планування нової екологічно безпечної концепції розвитку Чорнобильської зони відчуження, а також проаналізовано стан зон евакуації АЕС «Фукусіма-1». Територія таких зони є постійним джерелом надходження радіонуклідів у суміжні із зоною регіони і водночас, може бути ефективним захисним бар'єром від поширення радіонуклідів на прилеглі території.

3. Розроблено методологію моделювання процесів поводження з радіоактивними відходами за допомогою інтегрованого використання різноманітних аналітичних інструментів наукометричної БД Scopus і методів візуалізації.

4. Розроблення нових матричних матеріалів в поєднанні з наночастинками для агломерації і концентрації радіонуклідів є перспективним інноваційним методом модифікації радіолізу при виробництві водню з рідких радіоактивних відходів. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення напрямків фіксації радіонуклідів і важких металів у матричному матеріалі різного генезису.

5. Чинники взаємодії в сфері досліджень візуалізовані за допомогою програмного забезпечення VOSViewer з використанням бібліометричних даних з БД Scopus. Здійснено моделювання кластерів інноваційних процесів у сфері утилізації радіоактивних відходів, що дало можливість визначити напрями оптимізації процесу дезактивації радіоактивних відходів з використанням сучасних технологічних рішень.

Перелік джерел посилання

1. Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2014 році. URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=285032>
2. Створення Чорнобильського біосферного заповідника. Міністерство екології та природних ресурсів України. URL: <http://www.menr.gov.ua/press-center/news/123-news1/3854-ministr-ihor-shevchenko-rozpoviv-pro-stvorennia-chornobylsko-ho-biosferno-ho-zapovidnyka>
3. Поводження з РАВ. Інформація із сайту Рівненської атомної електростанції. URL: <https://www.rnpp.rv.ua/general-info.html>
4. Кондратьєв С. М., Борозенець Г. П., Ярмош І. В., Кутузова Т. Я., Чепурний Ю. В. Поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях України. Стан та проблеми. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2016. № 2(70). С. 41–46. [https://doi.org/10.32918/nrs.2016.2\(70\).09](https://doi.org/10.32918/nrs.2016.2(70).09)
5. Основні перспективи розвитку зони відчуження. Інформація із сайту міжнародної конференції INUDECО. URL: <https://inudeco.pro/>
6. Міністерство екології та природних ресурсів України. Положення про Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. Наказ № 43 03.02.2017.
7. Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. Інформація із сайту з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї. URL: <https://www.uatom.org/chornobilski-j-radiatsijno-ekologichnij-biosfernij-zapovidnik>
8. Котова І., Черниш Є.Ю., Пляцук Л.Д. Чорнобильський біосферний заповідник: перспективи розвитку. Розвиток наукової думки постіндустріального суспільства: сучасний дискурс: матеріали міжнародної наукової конференції (Т. 2), 13 листопада, 2020 рік. Миколаїв, Україна: МЦНД. С.35–37.
9. Коніщук В. В. Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник у системі Пан'європейської екомережі. *Агроекологічний журнал*. 2016. № 1. С. 71–82.

10. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом». Звіт за 2016 рік, 2017. 137 с.
11. Землетрус у Японії 11 березня 2011 року: хроніка подій. Інформація із сайту Кореспондент.net. URL: <https://ua.korrespondent.net/world/1520868-zemletrus-u-yaponiyi-11-bereznia-2011-roku-hronika-podij>
12. Fukushima Daiichi Accident. Інформація із сайту World Nuclear Association. URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-daiichi-accident.aspx>
13. Kawasaki K. Current status and issues of Fukushima nuclear disaster areas and victims after lifting of evacuation orders: a case study of Namie Town. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2021, № 20. С. 101–113, DOI: 10.1080/13467581.2020.1780242
14. Katsumi S. Report of decontamination at Tominari Elementary School. *Annals of the ICRP*. 2016. Vol 45. Issue 2. P. 83-91.
15. Vinnitskii V.A., Chugunov A.S. Radioactive waste management in PWR technology: Some technical solutions for liquid radioactive media processing systems of the "nuclear island". *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Volume 1689, Issue 1, 11. DOI: 10.1088/1742-6596/1689/1/012009
16. Hossain F. Natural and anthropogenic radionuclides in water and wastewater: Sources, treatments and recoveries. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Volume 225. P. 106-123.
17. Lee S.G., Cheong J.H. Neutron activation of structural materials of a dry storage system for spent nuclear fuel and implications for radioactive waste management. *Energies*. 2020. Volume 13. Issue 20. P 52–75.
18. Поводження з РАВ. Інформація із сайту Державного агентства управління зоною відчуження. URL: <http://dazv.gov.ua/povodzhennia-z-rav/derzhavne-upravlinnya-u-sferi-povodzhennia-z-radioaktivnimi-vidkhodami-na-stadiji-jikh-zberigannya-i-zakhoronennia.html>

19. Державне спеціалізоване підприємство «Центральне підприємство з поводження з радіоактивними відходами» Комплекс виробництв «Вектор». Інформація із сайту Державного агентства управління зоною відчуження. URL: <http://dazv.gov.ua/informatsijni-materiali-dlya-zmi/derzhavne-spetsializovane-pidpriemstvo-tsentralne-pidpriemstvo-z-povodzhennya-z-radioaktivnimi-vidkhodami-kompleks-virobnitstv-vektor.html>

20. Al Ryalat S.A.S., Malkawi L.W., Momani S.M. Comparing Bibliometric Analysis Using PubMed, Scopus, and Web of Science Databases. *J Vis Exp*. 2019. № 152. <https://doi.org/10.3791/58494>

21. Joshi A. Comparison between Scopus & ISI Web of Science. *Journal Global Values*. 2016. VII (1). P. 1–11. <http://anubooks.com/wp-content/uploads/2017/08/2016-7-JVG-No.-1-1.pdf>.

22. Кравченко Г. А., Рассамагин С.В., Русанов С.В., Косарев И.Ю. Получение МОКС-топлива как один из этапов замыкания ядерного топливного цикла. *Ядерная и альтернативная энергетика*. 2013. № 2 (4). С. 60 – 64.

23. На ЧАЕС розпочав роботу завод із переробки радіоактивних відходів. Інформація із сайту мультимедійної платформи іномовлення «Укрінформ». URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/2742155-na-caes-rozpocav-robotu-zavod-iz-pererobki-radioaktivnih-vidhodiv.html>

24. Agayev T.N., Garibov A.A., Guseinov V.I. Influence of gamma-radiation on the hydrogen yield at water radiolysis on the surface of nano-zirconium, *PAST*. 2017. №5(111). P. 27–30.

25. Hervé du Penhoat M.-A., Goulet Th., Frongillo Y., Fraser M.-J., Philippe Bernat P., Jay-Gerin J-P. Radiolysis of Liquid Water at Temperatures up to 300 °C. A Monte Carlo Simulation Study. *J. Phys. Chem.* 2000. Vol. 104. №. 50. P.11757–11770.

26. Azarov S.I., Vilenska L.M., Korchevna O.V. Radiolysis of water in “Sarcophagus”. Prepr. Academy of sciences of the Ukraine Institute for Nuclear Research; KINR-98-5. Kiev, 1998. P. 23.

27. Duan J., Ji H., Xu T., Pan F., Liu X., Liu W., Zhao D. Simultaneous adsorption of uranium (VI) and 2-chlorophenol by activated carbon fiber supported/modified titanate nanotubes (TNTs/ACF): Effectiveness and synergistic effects. *Chemical Engineering Journal*, 2021. Volume 406. P. 126–152.
28. Noh W., Kim T.H., Lee K.-W., Lee T.S. Selective adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate from a Cs ion mixture by electrospun mesoporous silica nanofibers. *Chemosphere*. 2020. Volume 259. P. 127–141.
29. Mousa A.M., Abdel Aziz O.A., Al-Hagar O.E.A., Gizawy M.A., Allan K.F., Attallah M.F. Biosynthetic new composite material containing CuO nanoparticles produced by *Aspergillus terreus* for ⁴⁷Sc separation of cancer theranostics application from irradiated Ca target. *Applied Radiation and Isotopes*. 2020. Volume 166. P.109–119.
30. Suchánková P., Kukleva E., Nykl E., Nykl P., Sakmár M., Vlk M., Kozempel J. Hydroxyapatite and titanium dioxide nanoparticles: Radiolabelling and in vitro stability of prospective theranostic nanocarriers for ²²³Ra and ^{99m}Tc. *Nanomaterials*. 2020. Volume 10. Issue 9. P. 1–12.
31. Chernysh Y., Plyatsuk L., Azarov S., Tsutsumiuchi K., Kotova I. Modeling of innovation research clusters in the field of radioactive waste utilization. *Journal of Engineering Sciences*. Vol. 7(2). P. H1–H9.

ДОДАТОК А

**Копії матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій за темою
студентської наукової роботи**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

**МАТЕРІАЛИ
та програма**

**VII Всеукраїнської
науково-технічної конференції
(м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.)**

Суми
Сумський державний університет
2020

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА У СФЕРІ ПОВОДЖЕННЯ
З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ**

Радіаційна безпека

Радіаційна безпека

Останнім часом дедалі більшої актуальності у світі набуває проблема радіоактивної безпеки, тісно пов'язана із вимогою нерозповсюдження радіоактивних матеріалів[1]. В Україні продовжують проявлятися негативні екологічні наслідки Чорнобильської катастрофи. Передусім ідеться про широкомасштабне радіоактивне забруднення довкілля, велику кількість радіоактивних матеріалів і радіоактивних відходів на території промислового майданчика ЧАЕС і зони відчуження, що потребує безпечного поводження з ними. Як і раніше, проблемою залишається повернення до нормального життя територій за межами зони відчуження, що також зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС [2].

Основними джерелами утворення радіоактивних відходів (РАВ) в Україні є [3]:

- АЕС (Чорнобильська, Запорізька, Південноукраїнська, Рівненська, Хмельницька);
- підприємства з видобування та переробки уранової руди (Державне підприємство «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» у м. Жовті Води і виробниче об'єднання «Придніпровський хімічний завод» у м. Дніпродзержинськ);
- науково-дослідні організації, що використовують радіоактивні речовини або джерела іонізуючого випромінювання (Інститут ядерних досліджень НАНУ, Інститут прикладної фізики НАНУ, Харківський фізико-технічний інститут НАНУ тощо);
- промисловість і медицина.

Усі рідкі РАВ переробляються на заводі з переробки рідких радіоактивних відходів. Тут вони проходять процедуру затвердіння (імобілізації) і перетворюються на цементну суміш. Суміш утакується у 200-літрові бочки, які у свою чергу пакуються по 4 штуки у залізобетонний контейнер. Контейнер з переробленими рідкими РАВ відправляється на захоронення у спеціально обладнане при поверхневе сховище твердих радіоактивних відходів комплексу виробництва «Вектор»[4].

Ключовим елементом розвитку системи поводження з радіоактивними відходами в Україні є будівництво ряду споруд з поводження з радіоактивними відходами в зоні відчуження, включаючи [5]:

- споруди поводження з радіоактивними відходами на майданчику «Вектор», призначені для завершального етапу поводження з РАВ (централізоване захоронення та тривале зберігання) усіх виробників відходів в Україні, а також переробка деяких видів радіоактивних відходів із зони відчуження та незначні виробники відходів;

- будівництво об'єктів поводження з радіоактивними відходами на майданчику ЧАЕС;
 - обстеження ділянок для геологічного словаша.
- Також мають місце такі заходи згідно з [6]:
- ізоляція РАВ – захист РАВ від зовнішніх впливів шляхом фізичного відділення РАВ від оточуючого середовища;
 - забезпечувати безпеку під час проектування, вибірки майданчика, будівництва, експлуатації та зняття з експлуатації споруд та обладнання, призначених для поводження з радіоактивними відходами;
 - своєчасно здійснювати переоцінку безпеки діючих об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами;
 - забезпечувати розробку та реалізацію програм якості щодо безпеки поводження з радіоактивними відходами;
 - вести облік радіоактивних відходів;
 - забезпечувати радіаційний моніторинг місць зберігання та захоронення цих відходів;
 - вживати заходи щодо ліквідації радіаційних аварій та їхніх наслідків.

Більшість методів перероблення рідких радіоактивних відходів зводиться до утворення концентрованих відходів, які необхідно утримувати. Вони твердіють і їм надають зручної для безпечного зберігання і захоронення форми. Переведення радіонуклідів та інших безпечних сполук у тверді форми досягається вилученням вільної та кристалізованої води. Слід зазначити, що на сьогодні актуальним є пошук екологічно безпечних альтернатив поводження з РАВ.

Список літератури

1. Що таке радіоактивні відходи, які вони бувають і як утворюються? Інформація із сайту Державного агентства України з управління зоною відчуження. URL: <http://dazv.gov.ua/novini-ta-media/vsi-novyny/shcho-take-radioaktivni-vidkhodi-yaki-voni-buvayut-i-yak-utvoryuyutsya.html>
2. Іванюта С.П. Загрози у сфері екологічної безпеки та їх вплив на стан національної безпеки. Інформація із сайту Національного інституту стратегічних досліджень. URL: <http://old2.niss.gov.ua/content/articles/files/Monitoring-Eco-Ivanjuta-01d1c.pdf>
3. Пузік В.К., Рожков Р.В., Долгова Т.А. та ін. Знешкодження та утилізація відходів в агросфері: навч. посібник. Х: ХНАУ, 2014. 220 с.
4. Каміньська Н.В. Особливості правового регулювання поводження з радіоактивними відходами на національному та міжнародному рівнях. *Право і суспільство*. 2014. № 6.1(2). С. 134-138.
5. Plachkov H. Report on nuclear and radiation safety in Ukraine for 2018. Kyiv: State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2019. 63 p.
6. Наказ «Про затвердження Загальних положень безпеки при поводженні з радіоактивними відходами до їх захоронення», наказ Держатомрегулювання України від 01.08.2017 р. № 279.

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ



РОЗВИТОК НАУКОВОЇ ДУМКИ
ПОСТІНДУСТРІАЛЬНОГО
СУСПІЛЬСТВА: СУЧАСНИЙ ДИСКУРС

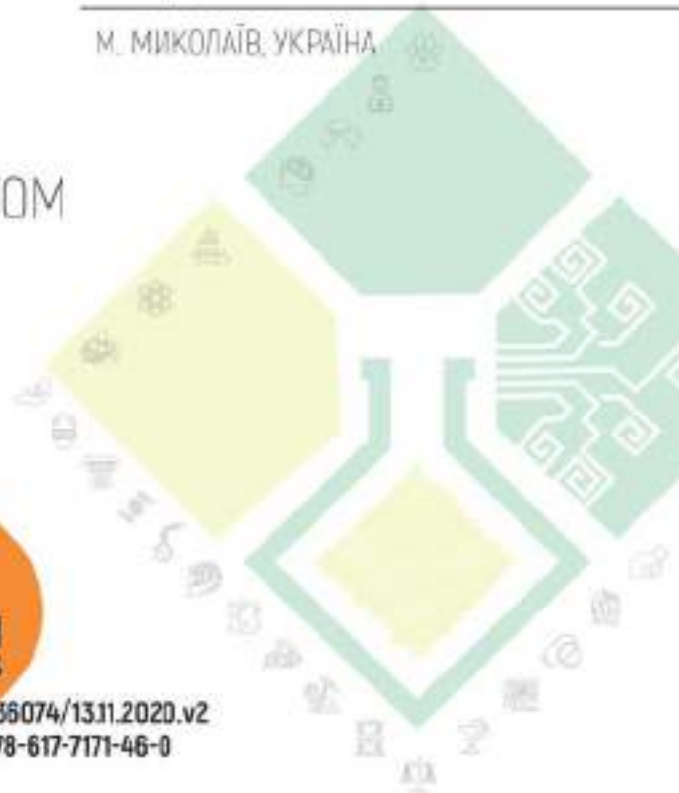
13 ЛИСТОПАДА 2020 РІК

М. МИКОЛАЇВ, УКРАЇНА

2ТОМ



DOI 10.36074/13.11.2020.v2
ISBN 978-617-7171-46-0



13 листопада 2020 рік • Миколаїв, Україна • МЦНД

ЧОРНОБИЛЬСЬКИЙ БІОСФЕРНИЙ ЗАПОВІДНИК: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Радіаційна безпека

Радіаційна безпека

Питання створення заповідної території в зоні відчуження науковцями й громадськістю було актуальним тривалий час. Чорнобильський біосферний заповідник було створено від 26 квітня 2016 року Указом Президента України. Заповідник розташований в Іванківському і Попільському районах Київської області в межах зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи [1].

Площа заповідника становить 227 тисяч гектарів, що займає 2/3 території від усієї Чорнобильської зони відчуження. Такі заповідники поширені у світі, наприклад, у Білорусі та на Уралі. Для України він є унікальним та найбільшим у країні. На його території є велике різноманіття: 23 наземних і 7 водних фітосистем, 5 різних видів ландшафтів, 303 види хребетних, 1256 видів вищих рослин, 120 видів лишайників та 200 видів мохів [2].

Основні завдання Заповідника зображені на рисунку 1 відповідно до даних [1].



Рис. 1. Блок-схема основних завдань створення Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника

Специфічною особливістю забезпечення ефективного менеджменту екомережі в межах Чорнобильського біосферного заповідника має стати радіаційна безпека, зменшення ризиків пожеж, перенесення і міграції радіонуклідів на прилеглі території [3]. Механізмом для оптимального та ефективного збереження ландшафтів, які є забрудненими, та мінімізацію загроз перенесення радіонуклідів є транскордонне співробітництво у контексті Поліської екологічної конвенції та Пан'європейської екомережі, яку потрібно обґрунтувати і ратифікувати між Білоруссю, Польщею, Росією та Україною.

За даними Державного агентства України з управління зоною відчуження першочерговим завданням є зміна статусу Чорнобильського біосферного заповідника з установи державного значення на спеціалізоване державне підприємство. Адже на сьогодні існують певні розбіжності у законодавстві щодо функцій Державного агентства України з управління зоною відчуження та Державної служби України з надзвичайних ситуацій, і відповідно у фінансуванні цих структур під час виникнення пожеж у Чорнобильській зоні. До причин тривалості лісових пожеж та їх безпосереднього виникнення можна віднести, зокрема, ліквідацію ключових галузевих лісопожежних установ, відсутність державного фінансування охорони лісів від пожеж та відсутність системних антипожежних досліджень в Україні тощо.

Відповідно до основних пріоритетних напрямів розвитку Чорнобильської зони відчуження була сформована модель, що наведена на рисунку 2.



Рис. 2. Інтегрована модель стратегії стійкого розвитку Чорнобильського біосферного заповідника

Для забезпечення контролю за пересуванням людей у зоні відчуження, може стати ефективним запровадження єдиної системи «Розумне місто», яка буде використовувати системи GPS та створення єдиного диспетчерського центру [4].

Важливим напрямом розвитку Заповідника є розбудова системи контролю, яка буде відповідати за дотримання природоохоронного законодавства та за посилений режим охорони природних об'єктів Заповідника. Ще одним, не менш важливим напрямом, є перспективна співпраця з науково-дослідними установами, відкриття для міжнародних досліджень лабораторно-експедиційної платформи, можливість створення транскордонного міжнародного біосферного резервату у

13 листопада 2020 рік ♦ Миколаїв, Україна ♦ МЦНД

співпраці з установами, такими як, Поліський державний радіаційно-екологічний заповідник (Білорусь) та природний заповідник «Древлянский».

Напрямок впровадження інноваційних технологічних рішень, на наш погляд, в першу чергу стосується системи управління радіоактивними відходами. Відповідно подальші дослідження будуть направлені на оптимізацію технічних рішень енергетичного використання рідких радіоактивних відходів, фіксації радіонуклідів у матричних структурах та визначення синергетичних закономірностей детоксикації ґрунту, як чинника біопродуктивності екосистеми, за допомогою модифікованих біокомпонентів різного генезису.

Висновки. У статті визначено основні напрями розвитку Чорнобильської зони відчуження із впровадженням у систему екомережі та сформовано інтегровану модель стратегії стійкого розвитку Чорнобильського біосферного заповідника.

Список використаних джерел:

1. Міністерство екології та природних ресурсів України. Положення про Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. Наказ № 43 03.02.2017.
2. Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник. Інформація із сайту з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї. Вилучено з: <https://www.uafom.org/chornobilsjij-radiatsijno-ekologichnij-biosfernij-zapovidnik>.
3. Коніцук В. В. (2016) Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник у системі Пан'європейської екомережі. *Агроекологічний журнал*, 1, 71–82. Вилучено з: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrog_2016_1_1
4. Основні перспективи розвитку зони відчуження. Інформація із сайту міжнародної конференції INUDECO. Вилучено з: <https://inudeco.pro/>

ДОДАТОК Б

Копія статті у фаховому виданні із переліку МОН України, що індексується в міжнародних наукометричних базах даних, за темою студентської наукової роботи

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Volume 7, Issue 1 (2020)



Радіаційна безпека, Рyztsak I., Azarov S., Tzutsunouchi K., (2020). Modeling of innovation research clusters in the field of radioactive waste utilization. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(2), pp. H1–H9. doi: 10.21272/jes.2020.7(2).h1

Modeling of Innovation Research Clusters in the Field of Radioactive Waste Utilization

Радіаційна безпека, Рyztsak I.¹ (0000-0001-0801-0845), Azarov S.² (0000-0001-0514-0847), Tzutsunouchi K.³ (0000-0001-7571-3990), Радіаційна безпека

Радіаційна безпека

¹Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, 47, Nauky Ave., 03380, Kyiv, Ukraine;
²Chubu University, 1200 Matsumoto, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan

Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

July 5, 2020

September 19, 2020

October 3, 2020

*Corresponding email:

e.chemish@issu.edu.ua

Abstract. The situation with the processing and disposal of radioactive waste, including the liquid phase, is not resolved. Many questions remain regarding the environmental safety of processes and the technological implementation of the most energy-efficient solutions. Thus, the article's main attention is paid to theoretical studies of the development innovation directions of radioactive waste processing using the VOSviewer software tool. The clusters were formed under modeling directions of applications of radiolysis for radioactive waste utilization: the red cluster includes research of radionuclide sorption processes and their concentration for radiolysis of liquid media; the green cluster concerns factors of influence on water radiolysis in hydrogen production; the yellow cluster includes research areas of natural processes related to radiolysis; the blue cluster is connected with mathematical modeling of radiolysis process with fuel production and engineering implementation and the purple cluster related to the processes of radioactive waste management and disposal as well as the application of radiolysis for this purpose. The cluster simulations of nanoparticle and radiolysis applications for radioactive waste treatment have resulted in a new energy recovery strategy. The development of new matrix materials in combination with nanoparticles for the agglomeration and concentration of radionuclides is a promising innovation method improving radiolysis under hydrogen production from radioactive waste.

Keywords: radioactive waste, nanoparticle, radiolysis, cluster simulations, software tool.

1 Introduction

Responding to the growing demand for sustainable development requires using the world's resources as productively and minimally as possible and keeping their negative impact on human health and the environment as low as possible.

The study [1] found that wind and nuclear power plants have the highest sustainability performance. Fuel elements using hydrogen from coal and natural gas have been identified as the most unfavorable conversion technologies in terms of sustainability.

However, the efficient and safe operation of the nuclear power plant (NPP) is very topical today. Thus, radioactive contamination of natural areas is one of the longest-lasting anthropogenic impacts on the environment. Duarte et al. (2019) have analyzed the de novo transcriptome of the Scottish pine population growing in the Chernobyl affected area, which is still contaminated with radionuclides due to the 1986 nuclear accident. Transcriptome profiles indicate a clear picture of the adaptive stress response, which seems to depend on the dose.

These adaptive reactions, which are caused by radiation doses 30 times lower than those recognized as safe for biota species under international standards, suggest that environmental management for radiation protection should be reviewed [2].

The disaster at the Japanese Fukushima-1 NPP in March 2011 is the largest radiation accident in the world after the Chernobyl nuclear power plant. Awareness of the causes of the incident and the scale of this disaster's consequences allows us to draw useful lessons for the future and develop a balanced attitude to the further development of nuclear energy, considering risks to human life and health.

The total release of radionuclides of iodine and cesium at Fukushima-1 so far corresponds to 10 % of what was thrown out during the Chernobyl accident (excluding uranium and plutonium that were raised during a fire from the Chernobyl reactor core). The destroyed Fukushima-1 reactors' total capacity is almost four times higher than the capacity of the 4th Chernobyl nuclear power plant unit. To this must be added the spent fuel assemblies (FA) that have

accumulated over the 40 years of operation of the Fukushima-1, which also played a negative role in developing the accident [3].

Besides, a significant amount of radioactive waste is generated at existing nuclear power plants. In general, they are generated through a wide range of activities related to nuclear facilities' operation, the use of closed radioactive sources in the industry, the production of mineral fertilizers, etc. (Azarov et al., 2018). For example, in the fuel elements of nuclear reactors, radioactive isotopes of xenon and krypton are produced significantly. One has to reckon with this during the regeneration of nuclear fuel. Naturally, dealing with radioactive gas is very inconvenient. For this purpose, use the γ -radiation of spent fuel elements of nuclear reactors and other sources, as well as radiation sources. Methyl alcohol for synthesis may contain up to 30 % water. Along with ethylene glycol, formaldehyde, water, carbon monoxide, hydrogen, and methane are formed [3].

Thus, improving the sorption ability of known types of materials is still relevant, and there is a high demand for new composite materials. Primarily they have high disinfection efficiency for solid materials, including the soil complex, and are also suitable for the elimination of the harmful effects associated with radiation pollution of ecosystems.

2 Literature Review

The radioactivity level in the waste affects the selection of its different management options due to its shielding requirements. The current internationally accepted classification system is based on the activity level and half-life. This system classifies the radioactive wastes to exempt (EW), low- and intermediate-level wastes (LILW), which may be subdivided into short-lived (LILW-SL) and long-lived (LILW-LL) wastes, and high-level wastes (HLW). Treatment is an essential phase in the management of radioactive waste. It aims to reduce the volume of generated wastes to enhance safety and/or reduce the costs of further management phases. After the treatment phase, the wastes split into two portions. The first is a small volume of concentrate that contains the bulk of radionuclides kept in the management system. The second is a large volume portion with low radioactivity that allows its discharge to the environment after meeting the regulatory requirements. To facilitate liquid radioactive waste management, they were categorized into aqueous and organic liquid wastes [4].

The solution to the safe treatment of radioactive waste is carried out by creating a multi-barrier system for their isolation from the sphere of human life and environmental protection. In this case, the population's effective dose due to radioactive waste after their disposal should not exceed $10 \mu\text{Sv} / \text{year}$.

Studies of radiolytic hydrogen sources were conducted in Depending on the dispersibility of the spent nuclear material, the concentration of soluble forms of radionuclides, the degree of vaporization of the bulk

materials, and water quality, calculation of the hydrogen yield rate was performed [5].

According to the State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management, a liquid radioactive waste treatment plant has been launched at the decommissioned Chernobyl nuclear power plant's site in Kyiv region. The liquid radioactive waste treatment plant has begun work at the Chernobyl NPP. According to Chernobyl NPP specialists, liquid waste is processed in several stages and, as a result, it is solidified in the form of a cement compound, which is a safer form of radioactive waste storage and disposal [6].

However, the situation with the processing and disposal of radioactive waste, including the liquid phase, is not resolved. Many questions remain regarding the environmental safety of processes and the technological implementation of the most energy-efficient solutions.

In this regard, the possibility of using the radiolysis of water and new matrix materials is of interest.

The trend in studies on the fixation of radionuclides with nanoparticles in the Scopus database was analyzed (Fig. 1). It should be noted that there is a growing interest in this area of research, which can be attributed to the widespread introduction of nanotechnology in various applications.

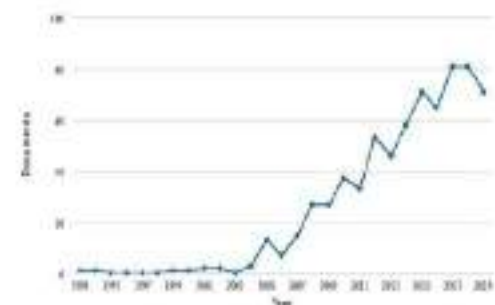


Figure 1 – A sampling of documents by year according to keywords "nanoparticle" and "radionuclide" in the Scopus database

Various combinations of keywords in the initial search for publications in the Scopus database were used for the analysis. In the initial search, the emphasis was on radiolysis and radioactive waste. It should be noted that the dynamics of the study of the subject matter in this area varies considerably by years (Fig. 2).

The article's main attention is paid to theoretical studies of the development innovation directions of radioactive waste processing using the VOS viewer software tool. To achieve the aim, the following tasks were set:

- modeling trends of nanoparticles usage in the field of radioactive waste management with the allocation of the main clusters behind the keywords in publishing activity;
- modeling trends of application of radiolysis in radioactive waste utilization with the allocation of the

main clusters behind the keywords in the publication activity.

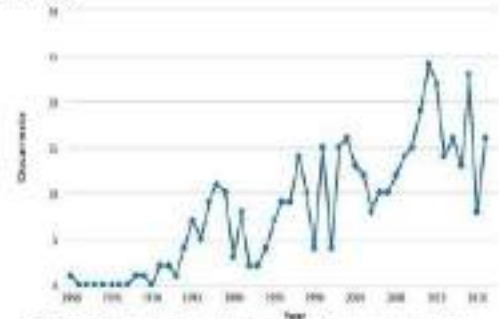


Figure 2 – A sampling of documents by year according to keywords “radioactive wastes” and “radiolysis” in the Scopus database

3 Research Methodology

The data on publication activity from the Scopus science database were used for modeling. The tools of the VOS viewer software product for visualization of clusters were used. When forming the General network visualization map by default, the program identifies several large zones (clusters), in which the interrelationships of keywords separate research areas in the study area. The greater is the number of neighboring elements and the smaller is the distance between these elements and a point of interest, the higher is the element density. Overlay visualization has been chosen as a more effective tool for checking the latest trends in time scale studies. The size of circles corresponds to the predominance of terms when publishing studies in this area. The distribution of colors depends on the year of publication (average for a cluster), with the last ones being in yellow. The main core clusters are determined by the timing of their relationships with each other.

4 Results and Discussion

Primary water radiolysis products include several chemical species: e_{aq}^- , $HO\cdot$, $H\cdot$, $HO_2\cdot$, H_2O_2 , $OH\cdot$, H_2O_2 and H_2 [7]. The main reactions are occurring during the three stages of water radiolysis (Table 1).

Table 1 – Different stages and their products in gamma radiation radiolysis of aqueous media (Abolini A. et al, 2016)

Different stages of radiolysis of water	Important reactions
Physical stage ($<10^{-15}$ s)	$H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^-$ $H_2O \rightarrow H_2O^*$
Physico-chemical stage ($\sim 10^{-15} - 10^{-12}$ s)	$H_2O^+ + H_2O \rightarrow OH + H_3O^+$ $H_2O^* \rightarrow H_2O$ $e^- \rightarrow e_{aq}^- \rightarrow e_{aq}^- + e_{aq}^-$
Non-homogeneous chemical stage ($10^{-12} - 10^{-6}$ s)	$H_2O \rightarrow e_{aq}^-$, $H\cdot$, $OH\cdot$, $H_2\cdot$, H_2O_2 , H^+ , OH^-

Where H_2O^+ is the ionized water molecule, H_2O^* is the excited water molecule, and sub-excitations electrons e_{aq}^- and e_{tr}^- are thermalized and trapped electrons, respectively [8]. Recently, in water-cooled nuclear reactors, radiolysis processes in water (in liquid and vapor states) and a vapor-phase reaction are considered a source of molecular hydrogen. The release of molecular hydrogen characterizes the radiolytic processes of hydrogen accumulation in reactors. They were observed during homogeneous radiolysis of water, which did not consider the effects of radiation and radiation-thermal processes of structural materials in contact with water on the accumulation of molecular hydrogen [9].

The radiolysis of water can be strongly affected by solid/liquid interfaces. In heterogeneous systems, all three stages can be modified from those taking place in bulk water. The energy deposition is different and various energy transfer processes can occur between the initial ionizing radiation-matter interaction and the chemical events observed in water. These phenomena can correspond to a change in the system's dose or to a change in initial radiolytic yields. Moreover, the reaction and diffusion of species can be modified by the presence of a solid phase during the chemical stage. All these phenomena are particularly salient when nanoporous materials with large specific surfaces are used (more than $50 \text{ m}^2/\text{g}$), as specific interfacial phenomena can thus be revealed. The respective energy levels in water and in silica are presented in Figure 3 [7].

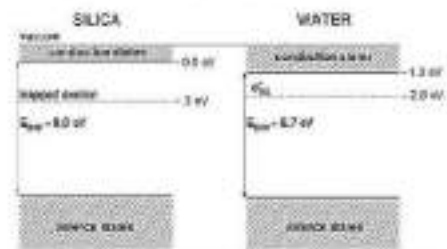


Figure 3 – Scheme of energy levels in water and silica. The conduction band edges concerning the vacuum level are taken as $V_{cl}(H_2O) = -1.2 \text{ eV}$ and $V_{cl}(SiO_2) = -0.9 \text{ eV}$, respectively. The difference between the valence and conduction band edge is 9.0 eV in silica and 8.7 eV in water (Le Cañh S., 2011)

The density of spurs along a radiation track is an important parameter in determining radiolysis products' chemical yields. For the low linear energy transfer (LET) radiation, the inelastic collision means the free path of the radiation (the primary electron) liquid water at $25 \text{ }^\circ\text{C}$ is about $1 \mu\text{m}$. At the same time, the spur size is about 20 nm [10].

Gamma rays have a smaller LET than charged particles. Consequently, their penetrating distance in a matrix is greater than α and β particles. The greater penetrating distance of γ radiation complicates modeling the radiolytic γ flux because possible curvature of the solid-water interface needs to be considered. Curved interfaces are often relevant for radiolysis studies.

The irradiance for each particle is determined by the angle of incidence (δ) and the inverse square of the distance traveled (R) (Fig. 4) [11].

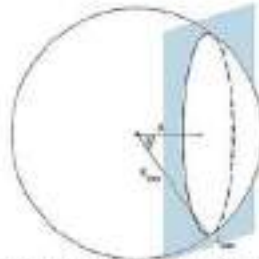


Figure 4 – Schematic illustration for the α and β equations, depicting the path of isotropic radiation. The gray planar surface represents the “solid–water” interface (water to the right of the plane) (Designs Mary E. et al., 2015)

R_{stop} is the stopping distance of the traveling α or β particle, x is the distance from the interface where the radionuclide is located, and δ is the angle of incidence (the angle between particle’s path and the normal to the planar interface) [11].

The parameters regulating such energy transfer include oxide band gap, energy migration distance, water adsorption, etc. However, the theoretical justification of the mechanisms of processes and phenomena occurring during the radiolysis of water in heterogeneous media requires further study and establishment. Thus, the chemistry induced by ionizing radiation at the oxide/adsorbate interface has many practical applications (e. g., transformation or decay of pollutants). Therefore, there is a need to fundamentally understand the radiolytic processes occurring on oxide surfaces [7].

Figures 5, 6 present the visualization by clusters of the main modern trends in publishing activity behind the research topic.

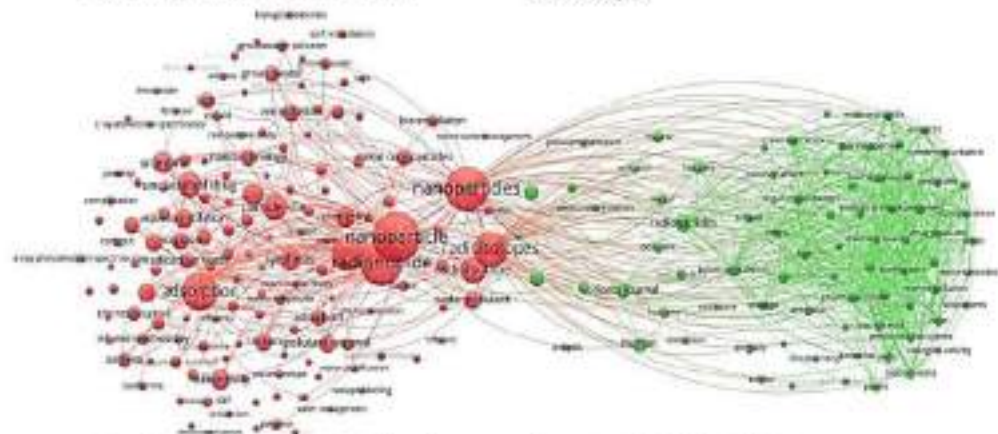


Figure 5 – General network visualization under nanoparticles usage in the field of radioactive waste management (constructed via VOSViewer v.1.6.15): 3 clusters, 12454 links, 35267 total link strength

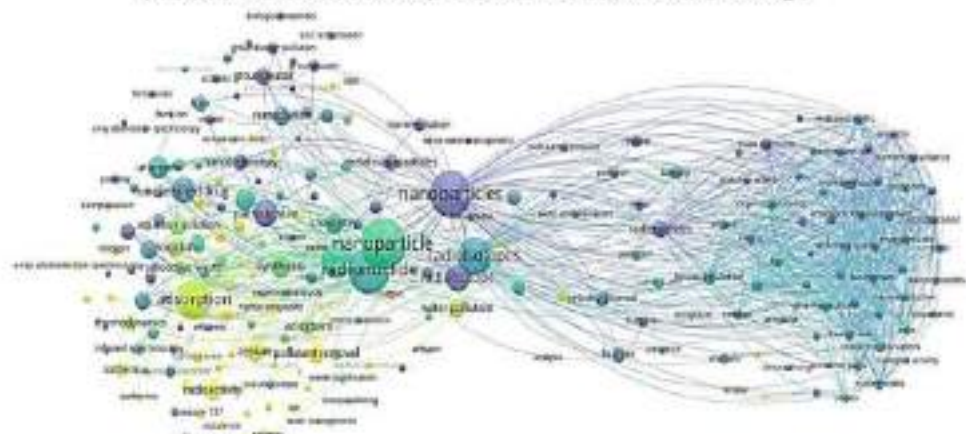


Figure 6 – Overlay visualization of most frequent terms under nanoparticles usage in the field of radioactive waste management (constructed via VOSViewer v.1.6.15), where the score of the item is the time since publication

The clusters were formed: a red cluster – investigation of sorption processes for removal of radioactive elements from liquid media [12–14] green cluster is related to the assessment of environmental and economic risks of radioactive contamination, bioaccumulation processes in the ecosystem and the impact on the human body (medicine application), while considering the possibility of applying nanotechnology to reduce these impacts [15–17]. The blue cluster is also distinguished, but it is still at the formation stage, so in essence, its selection is not clear. It is in the field of research of the red cluster.

Radiolytically synthesized nanoparticles are in the form of colloidal particles, which possess a huge surface-to-volume ratio and high specific surface area. As a result, a large part of the particle atoms' surface can be in contact with the surrounding liquid. This implies the formation of soluble macromolecules, which increase the rate of interactions or fasten the reactions. Thus, colloidal nanoparticles are thermo-dynamically unstable, which in the absence of counteracting force, will grow, and a colloidal system with nanoparticles in various shapes will be formed [18].

Payne et al (2013) considers a solution for decontamination of solid materials and preventing the spread of radioactive materials from a contaminated surface, which consists in the development of colloidal-stable nanosized selective sorbents that can penetrate (in the liquid phase) through contaminated solid materials and, in addition, easily separated by filtration and flocculation by polymer flocculants. Polymer nanoparticles (size range 50–500 nm) bearing carboxyl and epoxy groups on the surface will be synthesized by free radical polymerization [19].

In the study by Noerfors et al. (2016), bentonite was investigated, which is positioned as a radionuclide adsorbent. The adsorption of Th (IV), U (VI), Np (V), Tc (VII), and Pu (IV) on fractionated fractions of montmorillonite in synthetic carbonated groundwaters was studied. Montmorillonite colloids obtained by fractionation of crude clay material in the presence of organic matter at the initial stage of separation, there is a significant decrease in the adsorption of Th and Pu [20].

In addition, the study (Runde W. et al. 2002) presented the results of investigated the adsorption of Np and Pu on inorganic colloidal particles in water. The solubilities of plutonium, determined experimentally at pH 6.0, 7.0, and 8.5, are approximately two orders of magnitude higher than those calculated using the existing thermodynamic database indicating the effect of colloidal Pu (IV) species (Fig. 7) [21].

Despite real radioactive wastes containing different isotopes of varying concentrations, most tested sorbent materials were conducted using single and bi-solute competitive adsorption. There is a need to study these sorbents' behavior for removing the potential radionuclides as a multicomponent system [22].

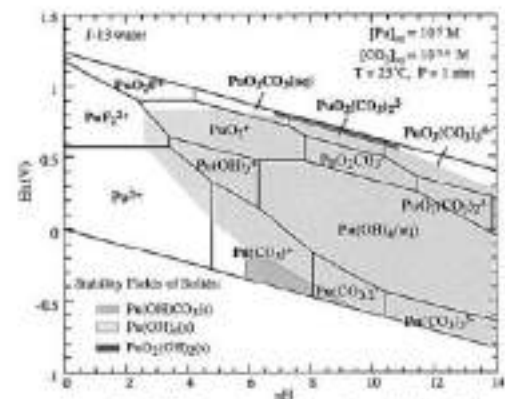


Figure 7 – Field formation of thermodynamically stable compounds with radionuclides (for example, plutonium) (Runde W. et al., 2002)

In the study by Pipiška et al. (2020) investigated pyrogenic carbon materials obtained as a result of the pyrolysis process of various raw material wastes, e.g., thermo-chemically transformed from wood chips, corn cobs, green garden waste, cherry stones, precipitation of municipal wastewater, etc. at slow pyrolysis in the atmosphere of N_2 . Experiments on cesium desorption adsorption were carried out using radioisotope ^{137}Cs . Although the tested materials differ significantly in removing ^{137}Cs , the absorption of Cs ions can be explained by Freundlich's surface adsorption mechanisms. The highest maximum sorption capacity was achieved for pine cones, chips, and garden waste of pyrogenic materials and reached 95.9–126 $\mu mol/g$. These results demonstrate the suitability of selected pyrogenic carbonaceous materials as Cs adsorbents, potentially suitable as reaction barriers for contaminated wastewaters containing Cs [23].

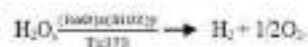
Preliminary or post-synthetic modification of sorbent materials is also intensively studied to increase their overall stability, durability, and sorption capacity without changing or damaging the basic matrix structure [24].

In the study by Sateshi Seino et al. (2001) was reported on experiments employing TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticle materials performed under various conditions, e.g., changing total absorbed dose, dose rate, amount of the nanoparticles, nanoparticle's size and processing procedure of nanoparticles. These are discussed to clarify the mechanism of enhancement of the hydrogen yield. It was indicated that reactions enhancing the hydrogen evolution are activated both by the γ -ray irradiation and existence of nanoparticles, and that surface of nanoparticles are deeply involved. Hydrogen yield depended on agglomerated particle size rather than that of the primary particle and chemical species of nanoparticles. The enhancement mechanism is dominated possibly by the radiolysis process rather than the photocatalytic process [25].

Dzougis et al. (2013) used the model to calculate the radiolytic production distribution in the water surrounding spent nuclear fuel. This study was chosen this example because it illustrates the applicability of the method to calculate water radiolysis by γ radiation at a curved interface. The result has important implications for safe handling, disposal, and storage of spent nuclear fuel [11]. From the water irradiated with γ -rays, hydrogen gas generates by radiolysis. In the case when the oxide nanoparticles such as SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 or ZrO_2 disperse in the water, the enhancement of the hydrogen gas generation has been observed. However, the cause of the enhancement is not obvious so far. This would be since the irradiation effects on the water, and the nanoparticles have not been distinguished. In the study by Kojima et al. (2006) SiO_2 nanoparticles have been pre-irradiated with ^{60}Co γ -rays before the experiments of radiolysis of water with the particles dispersing in it irradiation with ^{60}Co γ -rays. The present work results seem to show that the hydrogen gas generation in the particle dispersing water strongly depends on some changes in the characteristics of the particles induced by γ -ray pre-irradiation [26].

The prospects of using as a carrier of sorption-active compounds glass-crystalline glycolaluminosilicate microspheres formed during high-temperature combustion of pulverized coal at thermal power plants are studied. The presence of an amorphous aluminosilicate component with the content from 15 to 62 wt. % in different fractions gives the possibility to synthesize zeolite phases with ion-exchange and sorption properties on the surface of the zeolite phases microspheres [27].

The heterogeneous radiolysis of water was performed under the static conditions in special ampules. The kinetics of accumulation of molecular hydrogen during the heterogeneous radiolysis of water in the $\text{RaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ and $\text{RaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$ systems was studied. Two segments can be isolated: (i) on which the hydrogen accumulation rate on the initial linear segments is relatively high, (ii) with a relatively slow molecular hydrogen accumulation stage. The temperature effect on the rates of formation of molecular hydrogen during heterogeneous radiolysis of water was studied on the $(\text{RaO})_x(\text{SiO}_2)_y + \text{H}_2\text{O}$ systems because in experiments on the radium-silicate- H_2O system in closed ampules the temperature cannot be increased [28]:



In the case of radium silicate and silica gel, all types of particles on the surface and in the bulk of water can be involved in water radiolysis. The generations of δ electrons that quit the solid phase possess sufficient energy for excitation of water molecules in the dissociative water level and initiation of radiolytic processes. Therefore, in heterogeneous radiation processes in the radium silicate + $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$, silica gel + $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$ systems, the yield of molecular hydrogen is higher than in heterogeneous radiolysis of water in the absorbed states. The observed high yield of molecular hydrogen can be explained by possible liberation

of nonequilibrium charge carriers $G(\delta, p)$, excitons $G(\text{ex})$, and nonrelaxed and scattered electrons $G(\text{egr})$.

The radiation-chemical yield of hydrogen for radium silicate + H_2O ($G(\text{H}_2) = 0.47 \text{ mol}/(100 \text{ eV})$) more than in the radiolysis of pure water ($G(\text{H}_2) = 0.45 \text{ mol}/(100 \text{ eV})$).

The kinetics of accumulation of molecular hydrogen with radiation, the radiation-thermal and thermal ($T = 300\text{--}673 \text{ K}$) processes radium silicate water [30].

It is shown that the formation of the surface-active centers and secondary electrons in the presence of radium silicate causes an increase in the saturation velocity of molecular hydrogen under thermal and radiation-thermal processes in the system radium silicate + H_2O [29].

The comparative analysis of Fourier IR -spectrums of absorption of nano-Zr+ $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ and nano-Zr+ $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$ heterosystems shows that in both cases, radiation decomposition of water molecules is followed by the formation of an oxide film on the surface of zirconium.

In the first case it is possible to find and register absorption bands (AB) of intermediate and active products, an ion - radical groups $\pi\text{-O}^\bullet$ and $\text{O}_2^{\bullet-}$, and also surface hydrides.

In nano-Zr+ $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$ heterosystem, full decomposition of water molecules, and in nano-Zr+ $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$ system - partial decomposition of water occurs [28].

In work [30], the surface of zirconia particles was characterized by various spectroscopic techniques, and the variation in the surface following γ irradiation observed. Hydrogen production by γ -radiolysis of the mixture of montmorillonite, a zeolite mineral, and seawater was also studied by Yuta Kumagai et al. (2013) in order to provide basic points of view for the influences of zeolite minerals, of the salts in seawater, and rise in temperature on the hydrogen production by the radiolysis of water. These influences are required to be considered in the evaluation of the hydrogen production from residual water in the waste zeolite adsorbents generated in the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station. As the mordenite's influence, additional production of hydrogen besides the hydrogen production by the radiolysis of water was observed. The additional hydrogen can be interpreted as the hydrogen production induced by the mordenite's absorbed energy at the yield of $2.3 \cdot 10^4 \text{ mol}/\text{J}$. The influence of the salts was observed as an increase in hydrogen production [31].

Based on these experimental results and further estimations, hydrogen generation dependent on decay heat and water content in the Submerged Demineralizer System vessel was finally reevaluated. The procedure and results in this reevaluation would help the decontamination of radioactive water at the Fukushima Daiichi NPP accident [32]. Studies performed at the VK-50 (operating a boiling reactor with natural circulation of the coolant) showed that the output of radiolytic gases with steam is largely determined by the power level and the quality of the coolant.

When analyzing the modes of the normal operation of the reactor, the coolant's radiolysis depends on the number of radioactive corrosion products in the coolant: ^{64}Cu , ^{65}Zn , and especially ^{59}Fe . With a pH change from 8 to 5,

development of new matrix materials combined with nanoparticles for the agglomeration and concentration of radionuclides is a promising method improving radiolysis under hydrogen production from radioactive waste.

This will allow additional study of new areas of liquid

radioactive waste processing and their decontamination.

Further research will be focused on the following task is study of the directions of fixation of radionuclides and heavy metals in the matrix material of various genesis.

References

1. Onat, N., Bayar, H. (2010). The sustainability indicators of power production systems (Review). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14(9), pp. X3108–X3115.
2. Duarte, G. T., Volkova, P. Y., Geras'kin, S. A. (2019). The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone. *Environmental Pollution*, Vol. 250, pp. 618–626.
3. Tikhonov, M. N. (2015). Anthology of the disaster at the Japanese nuclear power plant Fukushima-1. *Health Risk Analysis*, No. 1, pp. 82–110.
4. Abdel Rahman, R. O., Ibrahim, H. A., Hung, Y.-T. (2011). Liquid radioactive wastes treatment: A review. *Water*, Vol. 3, pp. 551–565, doi: 10.3390/w3020551.
5. Azarov, S. I., Vilenka, L. M., Korcheva, O. V. (1998). Radiolysis of water in "Sarcophagus" (Prepr. Academy of Sciences of the Ukraine Institute for Nuclear Research, KINR-98-5).
6. Information Agency "Unian" (2019). Retrieved from <https://www.unian.info/kiev/10621401-liquid-radioactive-waste-treatment-plant-launched-in-kyiv-region.html>.
7. Le Caer, S. (2011). Water radiolysis: Influence of oxide surfaces on H₂ production under ionizing radiation. *Water*, Vol. 3, pp. 235–253, doi: 10.3390/w3010235.
8. Abedini, A., Bakar, A. A., Larki, F., Menon, P. S., Islam, M. S., Shaari, S. (2016). Recent advances in shape-controlled synthesis of noble metal nanoparticles by radiolysis route. *Nanoscale Research Letters*, Vol. 11(1), 287, doi: 10.1186/s11671-016-1500-z.
9. Agayev, T. N., Garibov, A. A., Guseinov, V. I. (2017). Influence of gamma-radiation on the hydrogen yield at water radiolysis on the surface of nano-zirconium. *Problems of Atomic Science and Technology*, Vol. 5(111), pp. 27–30.
10. Yousefi, N. (2014). Gamma-Radiolysis Kinetics of Liquid, Vapour and Supercritical Water. Ph.D. Thesis, Western University. Retrieved from <https://ir.lib.uwo.ca/td/2343>.
11. Dzaugis, M. E., Spivack, A. J., d'Hondt, S. (2010). A quantitative model of water radiolysis and chemical production rates near radionuclide-containing solids. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 115, pp. 127–134.
12. Duan, J., Ji, H., Xu, T., Pan, F., Liu, X., Liu, W., Zhao, D. (2021). Simultaneous adsorption of uranium(VI) and 2-chlorophenol by activated carbon fiber supported/modified titanate nanotubes (TNTs/ACF): Effectiveness and synergistic effects. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 406, 126732.
13. Noh, W., Kim, T. H., Lee, K.-W., Lee, T. S. (2020). Selective adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate from a Cs ion mixture by electrospun mesoporous silica nanofibers. *Chemosphere*, Vol. 259, 127391.
14. Zhang, P., Wang, L., Du, K., Wang, S., Huang, Z., Yuan, L., Li, Z., Wang, H., Zhang, L., Chai, Z., Shi, W. (2020). Effective removal of U(VI) and Eu(III) by carboxyl functionalized MXene nanosheets. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 396, 122731.
15. Mousa, A. M., Abdel Aziz, O. A., al-Hagar, O. E. A., Gizawy, M. A., Allan, K. F., Attallah, M. F. (2020). Biosynthetic new composite material containing CuO nanoparticles produced by *Aspergillus terreus* for 47Sc separation of cancer theranostics application from irradiated Ca target. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 166, 109389.
16. Suchankova, P., Kukleva, E., Nykl, E., Nykl, P., Sakmar, M., Vlk, M., Kozempel, J. (2020). Hydroxyapatite and titanium dioxide nanoparticles: Radiolabelling and in vitro stability of prospective theranostic nanocarriers for ²²³Ra and ^{99m}Tc. *Nanomaterials*, Vol. 10(9), 1632.
17. Ordóñez, C., Watanabe, N., Kozaki, T. (2020). Migration of polyethylene glycol coated gold nanoparticles in surrogate natural barriers. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 57(7), pp. 813–824.
18. Abedini, A., Bakar, A. A., Larki, F., Menon, P. S., Islam, M. S., Shaari, S. (2016). Recent advances in shape-controlled synthesis of noble metal nanoparticles by radiolysis route. *Nanoscale Research Letters*, Vol. 11(1), 287, doi: 10.1186/s11671-016-1500-z.
19. Payne, T. E., Brendler, V., Oechs, M., Buzynski, B., Brown, P. L., Davis, J. A. (2013). Guidelines for thermodynamic sorption modelling in the context of radioactive waste disposal. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 42, pp. 143–156, doi: 10.1016/j.envsoft.2013.01.002.
20. Norrfors, K. K., Marsac, R., Bouby, M., Heck, S., Wold, S., Lutzenkirchen, J., Schäfer, T. (2016). Montmorillonite colloids: II. Colloidal size dependency on radionuclide adsorption. *Applied Clay Science*, Vol. 123, pp. 292–303.

21. Runde, W., Cornubson, S. D., Elbad, D. W., Lu, N.-P., Van Pelt, C. E., Tait, C. D. (2002). Solubility and sorption of redox-sensitive radionuclides (Np, Pu) in J-13 water from the Yucca Mountain site: comparison between experiment and theory. *Applied Geochemistry*, Vol. 17(6), pp. 837–853.
22. Abdel Rahmaa, R. O., Ibrahim, H. A., Hung, Y.-T. (2011). Liquid radioactive wastes treatment: A review. *Water*, Vol. 3, pp. 551–565, doi: 10.3390/w3020551.
23. Pipiška, M., Ballová, S., Frlstak, V., Duriska, L., Hrník, M., Demeňk, S., Holub, M., Soja, G. (2020). Assessment of pyrogenic carbonaceous materials for effective removal of radicesium, *Key Engineering Materials*, Vol. 838, pp. 103–110, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.838.103.
24. Vellingiri, K., Kim, K.-H., Pournara, A., Deep, A. (2018). Towards high-efficiency sorptive capture of radionuclides in solution and gas. *Progress in Materials Science*, Vol. 94, pp. 1–67, doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.01.002.
25. Seino, S., Yamamoto, T. A., Fujimoto, R., Hashimoto, K., Katsura, M., Okuda, S., Okitsu, K. (2001). Enhancement of hydrogen evolution yield from water dispersing nanoparticles irradiated with gamma-ray. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 38(8), pp. 633–636, doi: 10.1080/18811248.2001.9715076.
26. Kojima, T., Takayamagi, K., Taniguchi, R., Okuda, Sh., Seino, S., Yamamoto, T. A. (2006). Hydrogen gas generation from the water by gamma-ray radiolysis with pre-irradiated silicon nanoparticles dispersing. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2006, Vol. 43, pp. 1287–1288.
27. Chernykh, Y. Y., Vereshchagina, T. A., Mazurova, E. V., Parfenev, V. A., Solovsev, L. A., Vereshchagin, S. N., Sharonova, O. M. (2019). Magnetic composite sorbents for trapping heavy metals from liquid waste and their immobilization in a mineral-like matrix. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, Vol. 12(3), pp. 445–457, doi: 10.17516/1998-2836-0141.
28. Agayev, T. N., Garibov, A. A., Guseinov, V. I. (2017). Influence of gamma-radiation on the hydrogen yield at water radiolysis on the surface of nano-zirconium. *Problems of Atomic Science and Technology*, Vol. 5(111), pp. 27–30.
29. Agayev, T. N., Mansimov, Z. A., Melikova, S. Z. (2016). Water heterogeneous radiolysis in the presence of Radium silicate. *Problems of Atomic Science and Technology*, Vol. 4(104), pp. 26–31.
30. Carrasco-Flores, A. E., La Verca, A. J. (2007). Surface species produced in the radiolysis of zirconium nanoparticles. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 127, 234703, doi: 10.1063/1.2806164.
31. Kumagai, Y., Kimura, A., Taguchi, M., Nagaiishi, R., Yamagishi, I., Kimura, T. (2013). Hydrogen production in gamma radiolysis of the mixture of mordenite and seawater. *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 50(2), pp. 130–138, doi: 10.1080/00223131.2013.757453.
32. Nagaiishi, R., Morita, K., Yamagishi, I., Hino, R., Ogunwa, T. (2014). Reevaluation of hydrogen generation by water radiolysis in SDS vessels at TMI-2 accident. *Proceedings of 2014 Nuclear Plant Chemistry Conference 2014 Sapporo (NPC 2014)*, 2471.
33. Kursky, A. S., Kalygin, V. V. (2013). Radiolysis coolant and methods of explosion security in the boiling water reactors. *Bulletin of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov*, Vol. 3(72), pp. 116–122.

ДОДАТОК В

**Копія оригіналу науково-дослідної проєктної пропозиції із вченими
Університету Тюбу (Chubu University 中部大学)
у межах грантової програми Японського товариства розвитку науки
Галузь: заходи з охорони навколишнього середовища і суміжні галузі
(環境保全対策およびその関連分野)**

**Тема пропозиції: «Виробництво енергії з радіоактивних відходів»
(放射性廃棄物からのエネルギー生産)**

№ 33910 (2021)

機関番号	研究種目番号	応募区分番号	中区分	整理番号
33910	11	—	64	0001

令和2年度 (2021年度) 挑戦的研究 (萌芽) 研究計画調査

令和元年11月 2日
版

新規

研究種目	挑戦的研究 (萌芽)		
中区分	環境保全対策およびその関連分野		
研究代表者 氏名	(フリガナ)	ツツミウチ カナメ	
	(漢字等)	堤内 要	
所属研究機関	中部大学		
部 局	応用生物学部		
職	教授		
研究課題名	放射性廃棄物からのエネルギー生産		
研究の要約	<p>本研究は、2011年3月に起きた東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性廃棄物汚染の浄化、放射性廃棄物の運搬、そして蒸餾放射性廃棄物からのエネルギー生産を目的としたものである。応募者が最も力を入れて取り組みたいと考えている研究課題は『水の放射線分解』である。γ線などの放射線が水分子を分解してラジカル及びイオン種を生成するが、それらが反応して水素ガスができる。この反応は非常に効率が悪かったが、金属触媒の微粒子を存在させておくと生成効率が上昇し、粒子径が小さくなるほどさらに向上することがわかってきている。応募者は別系統の研究から酸化鉄ナノ粒子を調整しており、さらに小さな粒子で大規模な効率アップが期待できることから、放射性物質からのエネルギー生産に取り組むこととした。本研究ではさらに、酸化鉄ナノ粒子の表面を化学修飾し、放射性物質を吸着できるように改変する。そして、この粒子の磁気特性を利用して、汚染水や汚染土壌からの放射性物質を吸着し、磁力で磁気分離を試みる。そうすることで放射性廃棄物の蒸餾、そして蒸餾放射性廃棄物からのエネルギー生産を可能とする。</p>		

1 研究目的及び研究方法、応募者の研究遂行能力

本研究項目は審査区分表の「中区分」ないし「特別審査領域」で審査されます。記述に当たっては広い分野横断で多角的視点から審査が行われることに留意すること。

本欄には、

- ① 本研究の目的
- ② その研究目的を達成するための研究方法（研究体制（「研究組織」にある研究者及び研究協力者のそれぞれの役割）を含む）
- ③ 応募者の研究遂行能力（これまでの研究活動の具体的な内容等。必要に応じて今回の研究構想に直接関係しないものを含めてもよい。）

について、2頁以内で要点を絞って具体的かつ明確に記述すること。

① 本研究の目的

本研究は、2011年3月に起きた東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性廃棄物汚染の浄化、放射性廃棄物の濃縮、そして濃縮放射性廃棄物からのエネルギー生産を目的としたものである。

② その研究目的を達成するための研究方法

本研究で、申請者が最も力を入れて取り組みたいと考えている研究課題は『水の放射線分解』である。福島における事故で最も大きな印象を与えた映像の1つに原子炉の爆発があるが、あの爆発を引き起こした水素ガスを発生させた原因の反応である。この反応については既に研究がなされており、そのメカニズムについても理解が進んでいる（Радзюльска-Бороня Physbok L., Azarov S., Tsutsumizuchi K. Радиация безоточна Modeling of innovation research clusters in the field of radioactive waste utilization, *Journal of Engineering Sciences*, 7(2), H1-H9, 2020）。

電離放射線が水分子を図1のようにラジカルやイオン種に分解する。水中では表1に示すような反応が起こり、水素ガスが発生する。

さらに田辺らによれば、γ線が金属酸化物と水との境界を通過する際にコンプトン散乱やクーロン散乱が起こり、水分子へのエネルギー付与が増加し、水素ガスが発生するとあった。田辺らの研究ではアルミナ粉末を用いていたが、他の金属でも水の放射線分解は達成されるようであった（Yoshida T, Tanabe T, Sugie N *et al.* Utilization of gamma-ray irradiation for

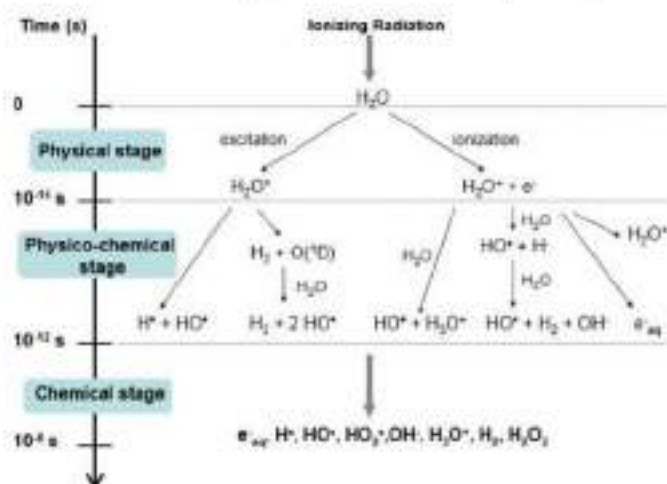


図1. 水の放射線分解によるラジカルおよびイオン種の生成

【1 研究目的及び研究方法、応募者の研究遂行能力（つづき）】

表 1. 水の放射線分解における素反応の速度定数

Reaction	Rate constant ($10^{10} \text{ mol}^{-1} \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$)
$e_{aq}^- + e_{aq}^- + 2H_2O \rightarrow H_2 + 2OH^-$	9.55
$e_{aq}^- + H^+ + H_2O \rightarrow H_2 + OH^-$	2.50
$H^+ + H^+ \rightarrow H_2$	9.78
$e_{aq}^- + HO^{\bullet} \rightarrow OH^-$	1.00
$e_{aq}^- + H_2O^{\bullet+} \rightarrow H^+ + H_2O$	2.30
$HO^{\bullet} + HO^{\bullet} \rightarrow H_2O_2$	9.55
$HO^{\bullet} + H^+ \rightarrow H_2O$	2.00
$H_2O^{\bullet+} + OH^- \rightarrow 2H_2O$	14.0

hydrogen production from water. *J Radioanal Nucl Chem.* 272, 471, 2007 ）。この研究によれば、アルミナ粉末の粒子径が小さくなるほど、単位体積当たりの水におけるアルミナ粉末との境界が数多く存在することになるため、水素ガスの発生が効率よく行われることが見出されている。なお、この論文では粒子径が $3 \mu\text{m}$ までしか、検討されておらず、その後の更なる研究展開はなされていない。

申請者はこれまでのがんの早期検出早期治療を実現できる材料として、核磁気共鳴画像法（MRI）の陰性造影剤として用いられている酸化鉄ナノ粒子にがん抗体を結合させる研究を行っていた。静脈注射した粒子が腫瘍組織へ集積する前に肝臓でトラップされてしまう問題を克服したり、MRIで検出されたらそのまま交流磁場を照射して酸化鉄ナノ粒子を発熱させて熱の力でがん細胞をさせられるよう発熱効率の高い粒子を得たりする目的のために、様々な酸化鉄ナノ粒子を調製している。

本研究ではこの酸化鉄ナノ粒子を用いて水の放射線分解を検討したい。粒子径は小さいもので 5 nm 程度のもので様々な用意できている。本学にはアイソトープセンターがあり、放射性物質を取り扱う環境は整備されており、 γ 線の線源である ^{60}Co の取り扱いも可能である。実験は先行研究に倣い実行すればよく、水とナノ粒子と線源、ステンレス製の耐圧反応容器、検出用のガスクロマトグラフィーで実施できる。これまでに報告例がないほど粒子径の小さい粒子を用いることで、水素ガスの発生効率が飛躍的に向上すれば、これまで処分方法に困っていた放射性廃棄物は、長らく利用できる便利なエネルギー源に生まれ変わる可能性を秘めている。放射性物質の飛散が心配されるが、燃料電池システムと組み合わせれば、発生した水素ガスを系外に取り出すことなく電気を取り出すことが可能なため、安全にエネルギー生産を継続することができるであろう。

本研究ではさらに酸化鉄ナノ粒子に放射性元素を吸着できるような化学修飾を検討し、汚染水や汚染土壌から放射性物質を吸着させ、磁石で分離して濃縮する技術の開発にも取り組みたい。この検討にはチェルノブイリ原発事故を経験したウクライナで活発に研究がなされており、Sunny State University の Chemysh 博士が協力してくれることになっている。

③ 応募者の研究遂行能力

応募者は放射化学における研究実績は全くないが、材料科学あるいは分析化学の分野では数多くの研究実績を有している。前述したように、ウクライナの Chemysh 博士と本研究課題について共同研究することに合意した。Chemysh 博士の人間を通じて様々な情報・技術を学び、原発事故からの回復という共通目標に向けて努力したいという情熱を有している。

2 挑戦的研究としての意義（本研究種目に応募する理由）

本研究種目は、これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる可能性を有する挑戦的研究を募集するものです。本欄には、

① これまでの研究活動を踏まえ、この研究構想に至った背景と経緯

② 学術的現状を踏まえ、本研究構想が挑戦的研究としてどのような意義を有するか、探求的性質の強い、あるいは非生え期の研究計画である場合には挑戦的研究としての可能性を有するかについて1頁以内で記述すること。

※特設審査領域に応募する場合は、③「本研究構想が当該特設審査領域に合致する理由」についても記述すること。

① これまでの研究活動を踏まえ、この研究構想に至った背景と経緯

申請者はこれまでに、がんの温熱治療に用いる発熱素子として酸化鉄ナノ粒子を調製し、その粒子径や結晶性、粒子表面の化学修飾などを最適化する研究を進めている。培養細胞やマウスを用いた動物実験を行い、その特性を評価しているため、様々な酸化鉄ナノ粒子を有している。

全く別の話になるが、申請者は一国民として、2011年3月の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故に心を痛め、研究者として何か貢献したいという想いを抱いていた。化学者として、物質が光エネルギーを吸収し、構造変化や化学反応する現象を目にすることから、放射性廃棄物を地下に埋設するのではなく、放射線として自発的に放出されているエネルギーを利用することができないか、あわよくば積極的にエネルギーを取り出すことにより、放射性廃棄物を積極的に分解し、半減期を大幅に短縮できないかと思いつけていた。ただ、このような研究は申請者の専門分野とはかけ離れており、研究者の妄想として処理されていた。

そんな中、令和元年7月に申請者の所属する中部大学応用生物学部にウクライナの Sunny Радіаційна безпека から客員研究員として Радіаційна безпека が来学し Радіаційна безпека 博士は廃水や下水汚泥の嫌気性微生物分解を研究しており、そこから生成するリン石膏の利用法などを開発していた。申請者が Chernysh 博士のセミナーを聴講した後、懇親会で研究について議論をしていたところ、新たな研究の展開としてチェルノブイリ原発事故で放射性物質汚染した地域の浄化を考えていることを知 Радіаційна безпека 博士の出身地はチェルノブイリ原発から 300 km ほど離れた場所に位置しており、放射能汚染の影響で知人が何人も亡くなっていることから、現在でも放射性物質汚染に対する意識が極めて高い。

そのようなことがきっかけになり、申請者 Радіаційна безпека と共同で放射性廃棄物汚染の浄化と濃縮放射性廃棄物からのエネルギー生産に関する研究を開始しようと思いついた。文献調査をしてみると、過去にも同様のことを考えた研究者がいた（田辺哲朗, 吉田朋子, 放射線の有効利用—放射性廃棄物の有効利用を目指して, 日本原子力学会誌, 48, 37, 2006）。田辺らの論文には『水の放射線分解による水素の発生』という項目がある。γ線が金属酸化物と水との境界を通過する際にコンプトン散乱やクーロン散乱が起こり、水分子へのエネルギー付与が増加し、水素ガスが発生するとあった。田辺らの研究ではアルミナ粉末を用いていたが、他の金属でも水の放射線分解は達成されるようであった。

そこで本研究では申請者が有する酸化鉄ナノ粒子を用いて、汚染水からの放射性廃棄物の濃縮とそれを用いた水の放射線分解による水素ガス発生を検討することとした。

挑戰的研究（精華） 4

3 人權の保護及び法令等の遵守への対応（公募要領4頁参照）

本欄には、本研究を遂行するに当たって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を、1頁以内で記述すること。

個人情報を含むアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、提供を受けた試料の使用、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となります。

該当しない場合には、その旨記述すること。

1. 放射性物質を用いた実験

放射性物質を用いた実験を行う際には、中部大学放射線安全委員会の指導を仰ぎ、中部大学放射線障害予防規程を遵守する。また、我が国の「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」も併せて順守し、安全に十分配慮しながら実験を実施する。

