



Ідентифікатор подання: 14

Тип: Секційна доповідь

## АНАЛІЗ АКТИВНОСТЕЙ БІОЛОГІЧНОГО ЗАХИСТУ І КОНСТРУКЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕАКТОРА ВВР-М

середа, 28 травня 2025 р. 17:15 (20 хвилин)

Число ядерних реакторів в усьому світі, які виводяться з експлуатації збільшується оскільки перші покоління реакторів досягли закінчення свого розрахункового терміну експлуатації. На сьогоднішній день виведені з експлуатації 200 енергетичних реакторів, з яких 12 – після пош-коджень в результаті аварії чи серйозного інциденту, 46 – передчасно з політичних міркувань, 139 – визнані нерентабельними чи такими, які відпрацювали розрахунковий термін експлуатації. Поряд з цим було виведено з експлуатації біля 500 дослідницьких реакторів та декілька па-ливних збірок.

В той же час АЕС є одним з найкрупніших джерел радіоактивного металобрухту та головним споживачем радіоактивно-забруднених матеріалів, які повторно використовуються. Величезна кількість доступного металу та його, переважно, низький рівень радіоактивності передбачають можливість його застосування в майбутніх енергоблоках. З врахуванням усіх типів ядерних установок, які будуть виведені з експлуатації, кількість металобрухту, отриманого в результаті виведення з експлуатації в найближче десятиліття оцінюється в ~ 30 млн. т.

Виходячи з вищевикладеного, метою даної роботи є як вимірювання активностей вищезгаданих радіонуклідів, так і довгоживучих радіонуклідів, розпад яких супроводжується випромінюванням  $\gamma$ -квантів за допомогою фотоактиваційної методики на зразках реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Цей реактор знаходиться в експлуатації 65 років та в певній мірі може використовуватись для моделювання активностей при виведенні з експлуатації дослідницьких реакторів.

В конструкційних матеріалах основною гамма-активністю після зупинки реактора і протягом наступних 50 років є активність  $^{60}\text{Co}$ . Вона легко вимірюється гамма-спектрометрами, зібраними на базі напівпровідникових детекторів, оскільки при розпаді  $^{60}\text{Co}$  випромінюються  $\gamma$ -кванти високої енергії (1173 та 1333 кеВ). Знаючи активність  $^{60}\text{Co}$  та співвідношення досліджуваних матеріалів порівняно з домішками кобальту можна розрахувати кількості радіоактивних нуклідів, які напрацьовуються в (п, $\gamma$ )-реакції. Для визначення співвідношення різних елементів в конструкційних матеріалах ми використовували фотоактиваційну методику [1].

Нами досліджувались зразки бетону (далі зр. №1) та конструкційних матеріалів (виготовлені зі сталі болт, кутник, гайка, шайба (далі зр. 2-5, відповідно)). На рис. 1-2 приведені фрагменти  $\gamma$ -спектрів бетону та шайби після опромінення гальмівними гамма-квантами на мікротроні М-30 Інституту електронної фізики НАН України (м. Ужгород). Інші зразки не опромінювались.

Було виконано дві серії опромінь та вимірювань при максимальній енергії електронів ( $E_{gr}$ ) 19.5 та 17.5 МеВ. Середній струм електронів складав 1 мкА при  $E_{gr}=19.5$  МеВ та 2 мкА при  $E_{gr}=17.5$  МеВ. Розкид електронного пучка по енергії не перевищував 0.25 % і він повністю накривав гальмівну мішень, яка складалася із танталової прямокутної пластини розмірами 5.2×4.6 см та товщиною 1.05 мм. За нею на відстані 8-20 см кріпились досліджувані мішені. За рахунок вищого струму та оптимального розташування мішеней вдалося досягти кращої активації при  $E_{gr}=17.5$  МеВ.

Спектри мішеней вимірювались на  $\gamma$ -спектрометрах, зібраних на базі HPGe-детекторів фірм Canberra та Ortec з ефективністю реєстрації (15-40)% порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами 3''×3'' та блоків електроніки цих же фірм. Енергетична роздільна здатність спектрометрів складала 1.8-2.0 кеВ на  $\gamma$ -лініях 1332 кеВ  $^{60}\text{Co}$ .

В  $\gamma$ -спектрах неопромінених зразків спостерігаються наступні довгоживучі радіонукліди:

$^{94}\text{Nb}$  ( $T_{1/2}=2\times 10^4$  років),  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}=30$  років),  $^{133}\text{Ba}$  ( $T_{1/2}=13$  років),  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{1/2}=5.27$  роки),  $^{152}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}=13$  років) та  $^{154}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}=8.6$  років). В опромінених зразках (див. рис. 1-2) спостерігаються активності  $^{57}\text{Ni}$  ( $(\gamma,n)$ -реакція на  $^{58}\text{Ni}$ ),  $^{89}\text{Zr}$  ( $(\gamma,n)$ -реакція на  $^{90}\text{Zr}$ ),  $^{99}\text{Mo}$  ( $(\gamma,n)$ -реакція на  $^{100}\text{Mo}$ ). Також спостерігаються активності  $^{47}\text{Ca}$  та  $^{43}\text{K}$ , як наслідок реакцій  $^{48}\text{Ca}(\gamma,n)^{47}\text{Ca}$  та  $^{44}\text{Ca}(\gamma,p)^{43}\text{K}$ , відповідно.

З цих даних, використовуючи формули активаційного аналізу для даних нуклідів були отримані співвідношення мас необхідних ізотопів по відношенню до маси кобальту та ро-зраховані активності (див. табл. 1-2). В останній стрічці кожної таблиці наведено питомі рівні звільнення (Азв) від регулюючого контролю для кожного радіонукліда.

Рис. 1. Фрагменти  $\gamma$ -спектру активованого зразка №1 при  $E_{\gamma} = 19.5$  МеВ. Вставка крайня справа зверху відповідає опроміненню при  $E_{\gamma} = 17.5$  МеВ.

Рис. 2. Фрагмент  $\gamma$ -спектру активованого зр. №5 при  $E_{\gamma} = 17.5$  МеВ.

Таблиця 1. Співвідношення мас та довгоживучі бета-активності в зразках з дослідницького реактора  
Радіонуклід  $^{41}\text{Ca}$  ( $^{40}\text{Ca}$ )  $^{59}\text{Ni}$  ( $^{59}\text{Ni}$ )  $^{63}\text{Ni}$  ( $^{62}\text{Ni}$ )  $^{93}\text{Zr}$  ( $^{92}\text{Zr}$ )  $^{93}\text{Mo}$  ( $^{92}\text{Mo}$ )  $^{99}\text{Tc}$

Співвідношення мас материнського нуклі-ду (в дуж-ках) та  $^{59}\text{Co}$  Зр. №1 42080(6300) 1.02(17) 0.054(9) 0.40(6)

Зр. №5 5.2(6) 0.28(3) 0.076(11)

Активність на 01.12.2024 р., мБк/г Зр. №1 52(9) 0.019(4) 1.6(3) 1.7(6) $\times 10^{-5}$

Зр. №5 22.0(31) 1870(240) 0.025(4) 3.9(6) $\times 10^{-4}$

Зр. №2 0.33(5) 28.0(36) 3.8(6) $\times 10^{-4}$  4.1(6) $\times 10^{-4}$

Зр. №3 0.23(3) 20.0(26) 2.6(4) $\times 10^{-4}$  1.6(2) $\times 10^{-4}$

Зр. №4 28(4) 2360(300) 0.032(5) 2.3(3) $\times 10^{-4}$

Азв, мБк/г 105 104 103

Таблиця 2. Довгоживучі гамма-активності в зразках з дослідницького реактора

Радіонуклід  $^{152}\text{Eu}$   $^{154}\text{Eu}$   $^{133}\text{Ba}$   $^{94}\text{Nb}$   $^{137}\text{Cs}$   $^{60}\text{Co}$

Активність на 01.12.2024 р., мБк/г Зр. №1 4.0(4) 9.1(9) 4.1(9) 19,0(16)

Зр. №5 240(10) 44.0(22) 5.3(1.1) 190(8) 1470(66) 4430(200)

Зр. №2 67(3)

Зр. №3 8.4(4) 47(2)

Зр. №4 118(5) 20.2(15) 3.6(7) 52.0(23) 5900(250) 5580(240)

Азв, мБк/г 100 - 100

Виміряні активності довгоживучих радіонуклідів, які утворились в конструкційних матеріалах та бетонному захисті за допомогою зразків, відібраних в реакторі ВВР-М. Вперше для даного дослідницького реактору зроблена оцінка внеску довгоживучих радіонуклідів, розпад яких не супроводжується випромінюванням гамма-квантів. Показано, що активності даних радіонуклідів, за виключенням  $^{63}\text{Ni}$  є значно нижчими рівнів звільнення, які можуть досягати десятків бекерель на грам.

В цілому можна відмітити, що найбільшу небезпеку представляє  $^{60}\text{Co}$ , активність якого для окремих зразків значно перевищує рівень звільнення, який складає 100 мБк/г. Слід також конт-ролювати вміст  $^{63}\text{Ni}$ , активність звільнення для якого складає 100 Бк/г.

1. V.A. Zheltonozhsky et al. Jour. of Envir. Rad. 227 (2021) 106509.

**Authors:** SAVRASOV, Andriy (Kyiv Institute for Nuclear Research); Д-р. MYZNIKOV, Dmytro (Kyiv Institute for Nuclear Research); Д-р. KULICH, Nadija (Kyiv Institute for Nuclear Research); Д-р. SLISENKO, Vasyl (Kyiv Institute for Nuclear Research); Д-р. ZHELTONOZHISKY, Viktor (Kyiv Institute for Nuclear Research)

**Доповідач:** Д-р. MYZNIKOV, Dmytro (Kyiv Institute for Nuclear Research)

**Тип засідання:** Атомна енергетика

**Класифікація за напрямком:** Атомна енергетика