

Науково-технологічні підходи щодо зняття з експлуатації ядерних реакторів з графітовим сповільнювачем. Стан вивченості та світовий досвід у вирішенні даної проблематики

Є. Т. Тегкаєв, К. В. Сімейко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

На сьогодні в світі все ще експлуатується 17 промислових енергоблоків з графітовим сповільнювачем та близько 65 реакторів зупинено й потребують остаточного зняття з експлуатації. Тому дуже гостро постає питання подальшого поводження з опроміненним графітом, загальна кількість якого становить більше 250 тис. тон. Успішне вирішення цього питання потребує всезагального, багатостороннього вивчення. Дослідницькі роботи проводились різними країнами в різний час, в даній доповіді наводиться стислий огляд найбільш вагомих дослідницьких програм, що були проведені за останні 20 років.

Метою роботи є ознайомлення широкого кола спеціалістів зі сучасним станом вивченості вказаної проблематики. Представлені матеріали можуть бути використані для розробки національних стратегій при поводженні з опроміненним графітом, його дезактивізації, кондиціонування, розробки методів захоронення, а також розробки загальних методів демонтажу графітової кладки ядерних реакторів.

Програма американського Науково-дослідного інституту електроенергетики EPRI (Electric Power Research Institute) фокусувалася на практичних аспектах демонтажу АЕС й була певною мірою першопроходцем у вивченні проблеми опроміненого графіту. Була розпочата в США в 2005 році, й охопила такі напрями дослідження як: (1) оцінка ризиків та безпеки при демонтажі - були проведені фундаментальні дослідження ризиків займання та вибуху графітового пилу, аналіз характеристик пилу, що утворюються при механічній обробці кладки, дослідження поведінки радіонуклідів ^{14}C , ^{36}Cl при вимиванні водою з графіту; (2) технології обробки та мінімізації відходів - розробка методів термічної та хімічної обробки для зменшення об'єму відходів, розробка стратегій довгострокового зберігання та захоронення, аналіз технології газифікації як способу розділення ізотопів; (3) цифрове моделювання та практичні інструменти демонтажу - методи дистанційного моніторингу тріщин та деформації кладки, наукове обґрунтування для створення національних стратегій захоронення опроміненого графіту.

В свою чергу проєкт CARBOWASTE (2008–2012) був головною науковою ініціативою Європейського Союзу (в межах 7-ї Рамкової програми) спрямованою на створення цілісної системи поводження з опроміненним графітом. На відміну від EPRI, яка більше фокусувалася на інженерних аспектах США та Британії, CARBOWASTE об'єднав 28 організацій з 11 країн (включаючи Литву, Францію та Німеччину) для вирішення проблем реакторів UNGG, AGR, РБМК та HTR.

CARBOWASTE розробив інструмент багатокритеріального аналізу рішень (Multi-Criteria Decision Analysis). Він дозволяє країнам обирати шлях (наприклад, «негайний демонтаж» vs «відкладений») залежно від їхнього законодавства, фінансів та наявності сховищ.

CARBOWASTE розділений на «Робочі пакети» (Work Packages - WP):

WP 1: Інтегроване управління відходами - створення «дорожньої карти», яка веде оператора АЕС від зупинки реактора до закриття сховища відходів.

WP 2: Характеристика графіту - детальний атлас того, як радіація змінює пористість та мікроструктуру графіту. Вперше було чітко розділено «органічний» та «неорганічний» вуглець-14.

WP 3: Вилучення та поводження - огляд технологій дистанційного вилучення блоків кладки. Аналіз ризиків механічного руйнування блоків при спробі їх витягнути.

WP 4: Дезактивація та переробка - порівняння ефективності термічних та хімічних методів. Висновок: термічна обробка (піроліз) є найбільш перспективною для промислового масштабу

WP 5: Захоронення та безпека - моделювання поведінки графіту в соляних, глиняних та гранітних сховищах на термін у 10 000 років.

Головним результатом програми було створення інтегрованого посібника (Tool Box), який допомагає країнам-учасникам вибирати оптимальні шляхи поводження з відходами — від вилучення та розділення до кондиціонування та остаточного поховання.

Проєкт GRAPA (Irradiated Graphite Processing Approaches) — це дослідницька ініціатива МАГАТЕ, яка стала логічним продовженням та об'єднавчим майданчиком для напрацювань проєктів EPRI та CARBOWASTE. Метою проєкту було створення цілісної міжнародної платформи для обміну

досвідом та розробки практичних рекомендацій щодо вилучення, аналізу, переробки та захоронення графітових відходів.

Ключові звіти та публікації МАГАТЕ є: (1) IAEA-TECDOC-1154 Irradiation damage in graphite due to fast neutrons in fission systems, (2) IAEA-TECDOC-1521 Characterization, Treatment and Conditioning of Radioactive Graphite from Decommissioning of Nuclear Reactors, (3) IAEA-TECDOC-1790 Processing of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal, (4) IAEA-TECDOC-2072 Managing Irradiated Graphite Waste.

1. Flammability and Explosivity of Decommissioning-Generated Graphite Dust. EPRI, Palo Alto, CA: 2006. Report No. 1014797. 112 p.
2. Characterization of Graphite Dust Generated During Cutting of Irradiated Graphite. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. Report No. 1015460. 86 p.
3. Graphite Decommissioning: Survey of Disposal Options and Leaching Behavior. EPRI, Palo Alto, CA: 2008. Report No. 1016772. 144 p.
4. Treatment of Irradiated Graphite: Review of Technologies for Waste Volume Reduction. EPRI, Palo Alto, CA: 2012. Report No. 1025215. 98 p.
5. Options for Management of Spent Nuclear Graphite. EPRI, Palo Alto, CA: 2014. Report No. 3002003102. 120 p.
6. International Review of Irradiated Graphite Waste Management. EPRI, Palo Alto, CA: 2017. Report No. 3002010619. 138 p.
7. Technical Basis for the Development of Graphite Waste Disposal Strategies. EPRI, Palo Alto, CA: 2022. Report No. 3002023914. 156 p.
8. Toulhoat, P., et al. (2010). Review of existing graphite waste management practices. CARBOWASTE Deliverable D-1.1.1. European Commission. 76 p.
9. Von Lensa, W., et al. (2011). Integrated Management Strategy for Irradiated Graphite. CARBOWASTE Deliverable D-1.3.1. European Commission. 84 p.
10. Petit, N., & Payne, S. (2011). Retrieval and Segregation of Irradiated Graphite. CARBOWASTE Deliverable D-3.2.1. European Commission. 92 p.
11. Marsal, V., et al. (2012). Report on the behaviour of i-graphite in disposal conditions. CARBOWASTE Deliverable D-5.3.1. European Commission. 115 p.
12. Banford, A. W., & Wickham, A. J. (2013). CARBOWASTE: Treatment and Disposal of Irradiated Graphite and Other Carbonaceous Waste. Final Summary Report. 210 p.
13. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.11. Progress in Radioactive Graphite Waste Management. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 254 p.
14. IAEA-TECDOC-1647. Irradiated Graphite Management: Progress in Selection and Optimization of Conditioning Options. Vienna: IAEA, 2010. 114 p.
15. IAEA Nuclear Energy Series NW-T-1.10. Processing of Irradiated Graphite to Meet Acceptance Criteria for Waste Disposal. Vienna: IAEA, 2016. 182 p.
16. IAEA-TECDOC-1799. Characterization of Irradiated Graphite in Nuclear Reactors. Vienna: IAEA, 2016. 146 p.
17. IAEA-TECDOC-1956. Approaches to the Management of Irradiated Graphite (Results of the GRAPA Project). Vienna: IAEA, 2021. 208 p.