



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –**  
**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

Τίτλος

Πυρηνικά απόβλητα, τύποι αποβλήτων, ιστορική αναδρομή, σημερινή κατάσταση, μελλοντικές τεχνολογίες διαχείρισης

Λαγού Μαρία

Επιβλέπων: Σταύρος Τριανταφυλλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ –**  
**ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

Τίτλος

Πυρηνικά απόβλητα, τύποι αποβλήτων, ιστορική αναδρομή, σημερινή κατάσταση, μελλοντικές τεχνολογίες διαχείρισης

Λαγού Μαρία

Επιβλέπων: Σταύρος Τριανταφυλλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις

Σταύρος Τριανταφυλλίδης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Αθανασάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2021

---

## *Ευχαριστίες*

---

Με την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων -Μεταλλουργών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Τριανταφυλλίδη για την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο των πυρηνικών αποβλήτων και για την καθοδήγησή του σε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένειά μου για την ουσιαστική στήριξή τους από την αρχή έως το πέρας των φοιτητικών μου χρόνων.

## Περίληψη

Τα ραδιενεργά απόβλητα, όπως και κάθε άλλη μορφή αποβλήτων, είναι το υπολειπόμενο προϊόν από τη λειτουργία μιας εγκατάστασης. Ο πιθανός αντίκτυπός του στο κοινό και το περιβάλλον εξαρτάται από τα φυσικά, χημικά και ραδιονουκλεϊδικά χαρακτηριστικά του. Τα ραδιενεργά απόβλητα, ιδιαίτερα εκείνα που παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, έχουν επίσης γνωστά σταθερά χαρακτηριστικά.

Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων και, συνεπώς, οι στρατηγικές διαχείρισης, διαφέρουν ριζικά μεταξύ των επικίνδυνων αποβλήτων (τα οποία μπορεί να έχουν μια σειρά επικίνδυνων χαρακτηριστικών, καθιστώντας τα εύφλεκτα, οξειδωτικά, διαβρωτικά, αντιδραστικά, εκρηκτικά, τοξικά (συμπεριλαμβανομένης της καρκινογένεσης) ή οικοτοξικά) και στα ραδιενεργά απόβλητα τα οποία, σε γενικές γραμμές, έχουν μόνο ως κίνδυνο την ραδιενέργεια (που μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη στους ιστούς ή θανάτους σε υψηλές δόσεις και που μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιο καρκίνο σε χαμηλότερες δόσεις).

Λόγω του τεράστιου και περίπλοκου ζητήματος, σε ότι αφορά την κατασκευή πυρηνικών ενεργειακών σταθμών, τα πυρηνικά απόβλητα εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπου και εξετάζεται η έννοια των ραδιενεργών αποβλήτων, ο τρόπος παραγωγής τους, οι τύποι αποβλήτων και οι λύσεις που προσφέρονται σε ότι αφορά τη διαχείριση αποβλήτων αλλά και τη διάθεσή τους, καθώς και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν αυτές οι λύσεις όσον αφορά την εφαρμογή τους.

## Abstract

Radioactive waste, like any other form of waste, is the product left over from the operation of a plant. Its potential impact on the public and the environment depends on its physical, chemical and radionuclide characteristics. Radioactive waste, especially that generated by nuclear power plants, also has known stable characteristics.

Waste characteristics, and therefore management strategies, differ radically depending on the type of hazardous waste. Such hazardous characteristics may be flammable, oxidizing, corrosive, reactive, explosive, toxic (e.g. carcinogenic). In particular, radioactive waste, due to their inherent radioactivity characteristics, may cause severe tissue damage or death in high doses and long-term cancer during lower dose exposure).

Due to the huge and complex issue regarding the construction of nuclear power plants, nuclear waste is examined in the context of this dissertation, including radioactive waste, the waste production and the types of waste and the solutions offered to concerning waste management and disposal, as well as the difficulties encountered by these solutions in implementing them.

---

## *Περιεχόμενα*

---

Περίληψη	3
Abstract	4
Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 1°	10
Πυρηνική ενέργεια	10
Κεφάλαιο 2°	15
Τύποι-κατηγορίες πυρηνικών αποβλήτων	15
Κεφάλαιο 3°	30
Ιστορική αναδρομή διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων	30
Κεφάλαιο 4°	50
Περιβαλλοντικά και κοινωνικο-οικονομικά προβλήματα των πυρηνικών αποβλήτων	50
Κεφάλαιο 5°	64
Σύγχρονες και μελλοντικές τεχνολογίες διαχείρισης	64
Κεφάλαιο 6°	74
Συμπεράσματα	74
Βιβλιογραφικές αναφορές	76

---

## Εισαγωγή

---

Η έννοια της «κρίσης απορριμμάτων<sup>1</sup>» που καθιερώθηκε ως λεκτική φράση στα τέλη της δεκαετίας του 1980 για να επισημάνει το πρόβλημα των απορριμμάτων, αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα θέμα έντονου ενδιαφέροντος, παρόλο που ο αριθμός των χώρων υγειονομικής ταφής παγκοσμίως παρουσιάζει σχετική μείωση και η ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται κατά κεφαλήν έχει αρχίσει πρόσφατα να σταθεροποιείται. Η ανθρωπότητα παράγει ουσίες που η φύση απλά δεν διαθέτει την ικανότητα αποσύνθεσης. Τα απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την πηγή ή τη βιομηχανία που παράγει τη συγκεκριμένη ροή αποβλήτων. Ορισμένες μεγάλες κατηγορίες αποβλήτων περιλαμβάνουν τα αστικά, τα επικίνδυνα, τα βιομηχανικά, τα ιατρικά, τα ραδιενεργά, τα γεωργικά απόβλητα και τα απόβλητα ή απορρίμματα εξόρυξης και κατασκευών (Pichtel, 2014).

Η πυρηνική ενέργεια πρέπει να αντιμετωπίζεται από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες: την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας για στρατιωτικούς σκοπούς (αρχικά, την ανάπτυξη ατομικών βομβών) και τη χρήση πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικές εφαρμογές (η πιο σημαντική, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Ωστόσο, ανεξάρτητα από αυτή τη διαίρεση, και οι δύο διαστάσεις είναι αλληλένδετες, καθώς η ύπαρξη της δεύτερης οφείλεται στην πρώτη.

Οι χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας είτε για στρατιωτικούς λόγους είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, διαμορφώθηκαν από τρεις παράγοντες, που οδήγησαν στην αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Πρώτον, η αύξηση της ζήτησης ενέργειας, λόγω της ταχείας αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της διαδικασίας εκβιομηχάνισης και αστικοποίησης στην οποία εμπλέκονται οι αναπτυσσόμενες χώρες (π.χ. Ινδία, Νοτιοανατολική Ασία και Κίνα) (International Energy Agency, 2019). Δεύτερον, η αυξημένη σημασία της ενεργειακής ασφάλειας, ιδίως στις ευρωπαϊκές χώρες, εξαρτάται πολύ από τις εισαγωγές και μπορεί να ωφεληθεί από

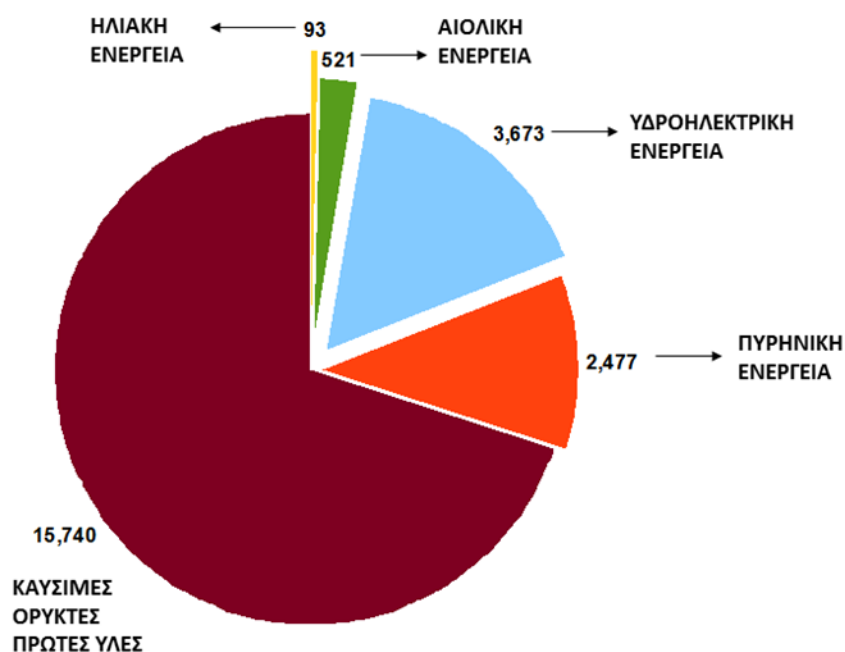
---

<sup>1</sup> Όρος στην αγγλική: garbage crisis

την πυρηνική ενέργεια ως αξιόπιστη και προσιτή πηγή ενέργειας (EU energy trends to 2030, 2009). Και τρίτον, η ανάγκη ανακατεύθυνσης των διαδικασιών παραγωγής ενέργειας προς ένα μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής (European Commission, 2011).

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους τρεις παράγοντες, είναι προφανές πώς η πυρηνική ενέργεια θα μπορούσε να κατέχει μερίδιο στο σύνολο των πηγών ενέργειας του μέλλοντος, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ως εναλλακτική λύση για τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.

Εικόνα 1. Παγκόσμια Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (TWh)



Πηγή: (Annual Reporting Archive | Investors | Home, 2016)



Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να είναι μια ασφαλής πηγή ενέργειας, όχι τόσο εξαρτημένη από τις διακυμάνσεις των τιμών και τις γεωπολιτικές συνθήκες όσο τα ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο ή ο γαιάνθρακας. Δεδομένου ότι δεν εξαρτάται τόσο πολύ από τις εισαγωγές (ακόμη και αν για ορισμένες χώρες, απαιτείται ακόμη η εισαγωγή εμπλουτισμένου ουρανίου), η παροχή ενέργειας είναι αξιόπιστη, ανταγωνιστική και διαθέσιμη κατόπιν ζήτησης. Και σε αντίθεση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα, δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα στη διαδικασία (με μείωση της ποσότητας που σχετίζεται με την κατασκευή αντιδραστήρων).

Είναι αυτονόητο ότι η πυρηνική ενέργεια δεν είναι η μόνη απάντηση για την αντιμετώπιση των ζητημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Όπως είπε ο διάσημος επιστήμονας James E. Lovelock στο διάσημο άρθρο του «Η πυρηνική δύναμη είναι η μόνη πράσινη λύση» για το *The Independent* το 2004 (King, 2007):

*«Η αντίθεση στην πυρηνική ενέργεια βασίζεται σε παράλογο φόβο που τροφοδοτείται από τη φαντασία του Χόλιγουντ, τα πράσινα λόμπι και τα μέσα ενημέρωσης. Αυτοί οι φόβοι είναι αδικαιολόγητοι και η πυρηνική ενέργεια από την αρχή της το 1952 αποδείχθηκε η ασφαλέστερη από όλες τις πηγές ενέργειας. [...] Ακόμα κι αν είχαν δίκιο σχετικά με τους κινδύνους της, και δεν είναι, η παγκόσμια χρήση της ως κύρια πηγή ενέργειας μας θα αποτελούσε ασήμαντη απειλή σε σύγκριση με τους κινδύνους ανυπόφορων και θανατηφόρων κυμάτων θερμότητας και της στάθμης της θάλασσας που αυξάνονται για να πνίξουν κάθε παράκτια πόλη του κόσμου. Δεν έχουμε χρόνο να πειραματιστούμε με ουτοπιστικές πηγές ενέργειας. Ο πολιτισμός βρίσκεται σε άμεσο κίνδυνο και πρέπει να χρησιμοποιήσει την πυρηνική - την ασφαλή, διαθέσιμη, πηγή ενέργειας - τώρα ή να υποστεί τον πόνο που θα προκληθεί σύντομα από τον εξοργισμένο πλανήτη μας».*

Λόγω του τεράστιου και περίπλοκου ζητήματος, σε ότι αφορά την κατασκευή πυρηνικών ενεργειακών σταθμών, τα πυρηνικά απόβλητα εξετάζονται στο πλαίσιο

της παρούσας πτυχιακής εργασίας, όπου και εξετάζεται η έννοια των ραδιενεργών αποβλήτων, ο τρόπος παραγωγής τους, οι τύποι αποβλήτων και οι λύσεις που προσφέρονται σε ότι αφορά τη διαχείριση αποβλήτων αλλά και τη διάθεσή τους, καθώς και τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν αυτές οι λύσεις όσον αφορά την εφαρμογή τους. Πρόσθετα, εκτεταμένη αναφορά θα πραγματοποιηθεί στην ιστορική αναδρομή της διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων, αλλά και τις κοινωνικο-οικονομικές επιπτώσεις που συνεπάγονται. Τέλος, επιχειρείται η περιγραφή των μελλοντικών διαχειριστικών μοντέλων των πυρηνικών αποβλήτων όπως αυτές αποτυπώνονται στη βιβλιογραφία.

---

## *Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>*

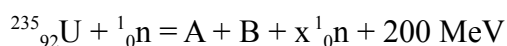
### *Πυρηνική ενέργεια*

---

Το νετρόνιο ανακαλύφθηκε από τον Chadwick (1932) από την αλληλεπίδραση σωματιδίων άλφα ( $\alpha$ ) με το βηρύλλιο ή το βόριο (Chadwick, 1932). Η έλλειψη φορτίου των νετρονίων που οδηγεί σε εύκολη διείσδυση στην ύλη και στον φορτισμένο πυρήνα, τα χαρακτηρίζει ως σωματίδια ικανά για τη χρήση στην ανίχνευση των πυρήνων. Οι Fermi et al (1934) χρησιμοποίησαν νετρόνια που παράγονται από φυσικές πηγές άλφα για να μελετήσουν τις πυρηνικές αντιδράσεις σε ένα μεγάλο εύρος πυρήνων και διαπίστωσαν ότι η ισχύς της αλληλεπίδρασης ποικίλλει σημαντικά από πυρήνα σε πυρήνα και ότι σε πολλές περιπτώσεις η αλληλεπίδραση μπορεί να ενισχυθεί με τον έλεγχο της ενέργειας νετρονίων με υδρογόνο (Fermi et al., 1934). Αργότερα, το νετρόνιο ανακαλύφθηκε ότι παράγει σχάση στο ουράνιο και αυτό οδήγησε στη μεγάλη προσπάθεια της δεκαετίας του 1940 για την παραγωγή πυρηνικών αντιδραστήρων και όπλων (Cacuci, 2010).

Παγκοσμίως, το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από πυρηνικούς σταθμούς (World Nuclear Association, 2019). Οι ιδιότητες της ραδιενέργειας χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλές άλλες εφαρμογές: στη χημεία, τη βιολογία (μελέτη κυττάρων), τη γεωλογία, την αρχαιολογία (χρονολόγηση), τη γεωργία και την ιατρική (διάγνωση και θεραπεία καρκίνων). Έχει επίσης πολλές χρήσεις στη βιομηχανία, για παράδειγμα, συντήρηση τροφίμων, έλεγχος συγκολλήσεων στη μεταλλουργία, αποστείρωση ιατρικού εξοπλισμού ή ανίχνευση πυρκαγιάς. Όλες αυτές οι δραστηριότητες παράγουν απόβλητα, μερικά από τα οποία είναι ραδιενεργά. Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι υλικό που δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ή να επανεπεξεργαστεί εύκολα, αν και αναφέρεται η χρήση του απεμπλουτισμένου ουρανίου σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε θωρακίσεις αρμάτων μάχης ή βλήματα. Η ραδιενεργός του φύση το καθιστά δυνητικά επικίνδυνο για την υγεία. Πρέπει επομένως να υπάρχει συγκεκριμένη διαχείριση.

Η πυρηνική ενέργεια βασίζεται σε μια διαδικασία που ονομάζεται σχάση, η οποία περιλαμβάνει τη διάσπαση ατόμων  $^{235}\text{U}$  από νετρόνιο (n):



Ο διαχωρισμός του ατόμου  $^{235}\text{U}$  απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας, η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ατμού, που καθοδηγεί τους στροβίλους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αντίδραση είναι αυτοσυντηρούμενη, επειδή ο διαχωρισμός απελευθερώνει επίσης περισσότερα νετρόνια, τα οποία μπορούν να συνεχίσουν να χωρίζουν περισσότερους πυρήνες  $^{235}\text{U}$  (η διαδικασία αυτή ονομάζεται «αλυσιδωτή αντίδραση»). Όταν ένα άτομο  $^{235}\text{U}$  διαχωρίζεται, σχηματίζει δύο μικρότερα άτομα (με την ένδειξη A + B για απλότητα στην παραπάνω εξίσωση), τα οποία είναι ασταθή. Αυτά τα μικρότερα άτομα περιλαμβάνουν προϊόντα σχάσης και δευτερεύοντα σωματίδια, τα οποία είναι εξαιρετικά ραδιενεργά (Lee et al., 1985).

Προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε παρανόηση, προτείνεται ένα σύνολο ορισμών, οι οποίοι προέρχονται από τη γαλλική νομοθεσία:

1. Μια ραδιενεργή ουσία είναι μια ουσία που περιέχει φυσικά ή τεχνητά ραδιονουκλεΐδια σε αρκετή συγκέντρωση, έτσι ώστε να δικαιολογεί κάποια δράση ή έλεγχο ραδιοπροστασίας.
2. Ένα πυρηνικό καύσιμο θεωρείται ένα αναλωμένο καύσιμο, όταν έχει χρησιμοποιηθεί σε πυρηνικό αντιδραστήρα και αποσυρθεί οριστικά.
3. Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι ραδιενεργές ουσίες για τις οποίες προβλέπεται μία συγκεκριμένη διαδικασία επεξεργασίας μετά τη χρήση για παραγωγή ενέργειας.
4. Τα απόλυτα ραδιενεργά απόβλητα είναι τα ραδιενεργά απόβλητα, τα οποία δεν μπορούν να υποστούν επεξεργασία υπό τις παρούσες τεχνικές και οικονομικές συνθήκες, είτε για την εξαγωγή του πολύτιμου μέρους τους, είτε για τη μείωση του επικίνδυνου ή ρυπογόνου χαρακτήρα του.

Ο νομοθέτης για παράδειγμα της Γαλλίας έχει εισαγάγει μεγάλη ευελιξία σε αυτούς τους ορισμούς, για να λάβει υπόψη ένα μεταβλητό τεχνικό και οικονομικό πλαίσιο. Αν και η πολιτική διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων των κρατών που διαχειρίζονται την πυρηνική ενέργεια διαφέρει πολύ, οι παραπάνω ορισμοί φαίνεται να ισχύουν.

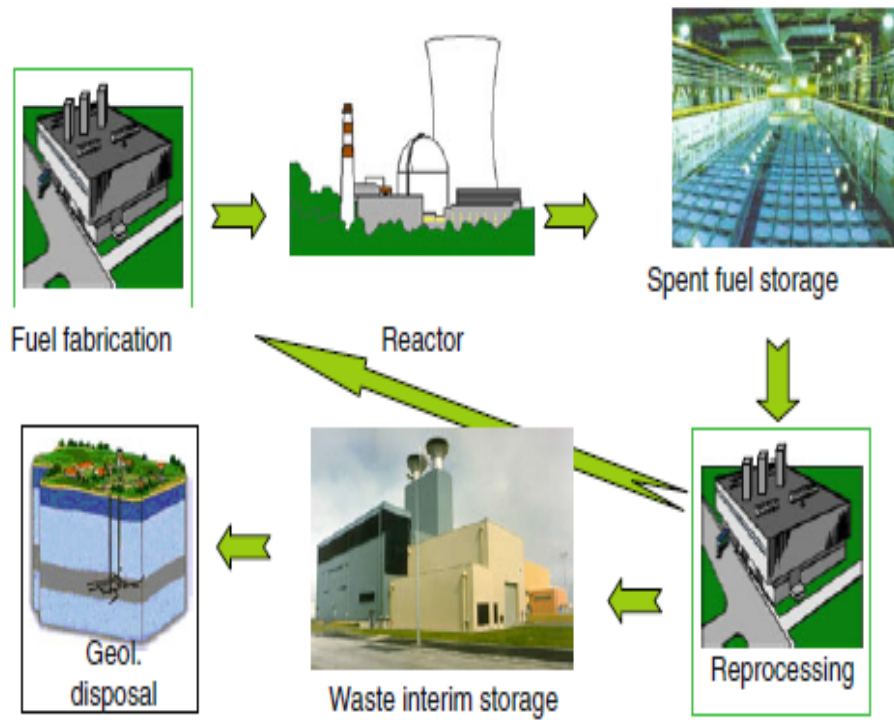
Η πυρηνική ενέργεια είναι μια πολύ πυκνή μορφή ενέργειας. Κατά συνέπεια, ο όγκος των πυρηνικών αποβλήτων που παράγονται από την παραγωγή δεδομένης ποσότητας ενέργειας είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με αυτόν που παράγεται από την παραγωγή ενέργειας ισόποσης από ορυκτά καύσιμα. Για να δοθεί μια τάξη μεγέθους, η τυπική μάζα αποβλήτων που παράγεται ετησίως ανά άτομο σε μια μέση δυτική χώρα είναι:

- Οικιακά απόβλητα: 2.200 kg
- Βιομηχανικά απόβλητα: 800 kg (εκ των οποίων 100 kg υψηλής τοξικότητας)

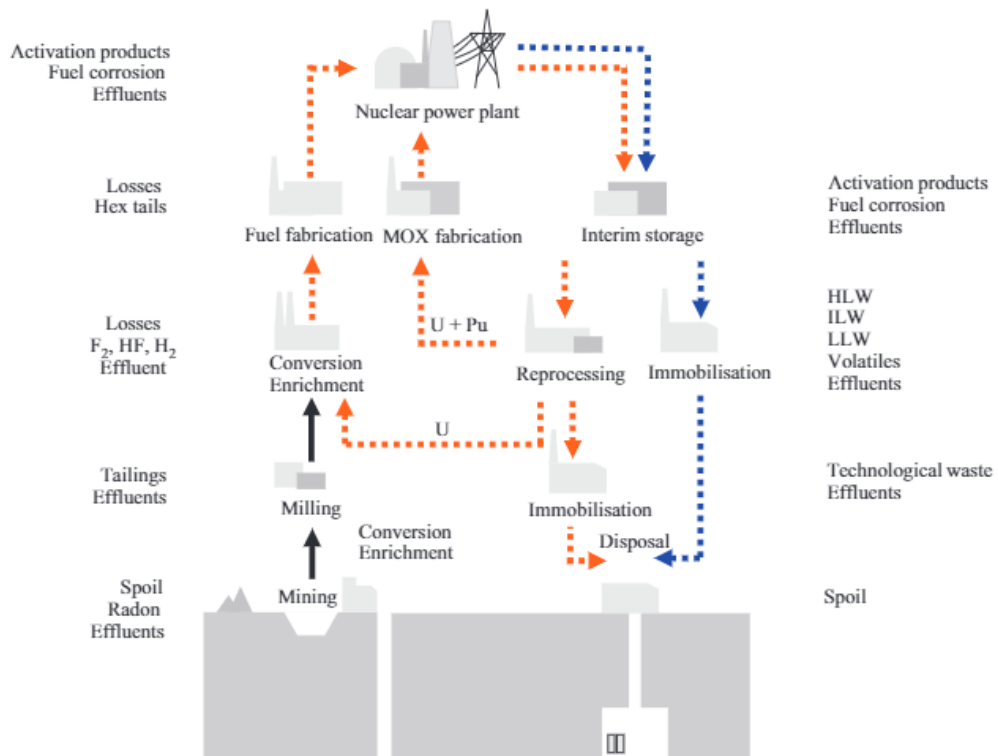
Εάν αυτή η χώρα χρησιμοποιούσε αποκλειστικά πυρηνική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η ετήσια παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων θα ήταν 1 κιλό (10 g υψηλής δραστηριότητας) (Cacuci, 2010).

Σε οποιαδήποτε βιομηχανική διαδικασία, η αποθήκευση διαδραματίζει το ρόλο ενός buffer μεταξύ δύο σταδίων της διαδικασίας. Στην περίπτωση των πυρηνικών αποβλήτων, η αποθήκευση παρέχει κάποια ευελιξία στη διαχείριση των αποβλήτων σε ότι αφορά την επεξεργασία τους, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία της γεωλογικής διάθεσης των τελικών αποβλήτων ή να επιλεγθεί η ψύξη μέσω της ραδιενεργούς αποσύνθεσης. Παράδειγμα χώρου αποθήκευσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Πρόσθετα στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής πυρηνικών αποβλήτων μέσω του κύκλου χρήσης των πυρηνικών καυσίμων.

Εικόνα 2. Παράδειγμα αποθήκευσης απορριμμάτων ή αναλωμένων καυσίμων του κύκλου καυσίμων (Casuci, 2010)



Εικόνα 3. Απόβλητα που παράγονται μέσω του κύκλου πυρηνικών καυσίμων. Τα πορτοκαλί βέλη υποδεικνύουν διεργασίες που λειτουργούν σε έναν κλειστό κύκλο καυσίμων, ενώ τα μπλε βέλη υποδεικνύουν εκείνες που λειτουργούν σε έναν ανοικτό κύκλο καυσίμων (Lee et al., 1985).



---

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Τύποι-κατηγορίες πυρηνικών αποβλήτων

---

Η πυρηνική σχάση αποτελεί μία ιδιαίτερα καλή πρακτική για τη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας επειδή είναι πολύ ισχυρή, παραγωγική και δεν έχει άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, προκύπτει ένα κρίσιμο μειονέκτημα: τα απόβλητα που απομένουν μετά την πυρηνική αντίδραση. Τα πυρηνικά απόβλητα αποτελούν την πιο μακροχρόνια, πιο ραδιενεργή και πιο τεχνολογικά απαιτητική διαδικασία από το σύνολο των αποβλήτων που παράγονται από την πυρηνική βιομηχανία (Massachusetts Institute of Technology, 2011). Αφορά σε επικίνδυνες ουσίες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, επειδή είναι εξαιρετικά ραδιενεργές, και ορισμένες από αυτές θα παραμείνουν έτσι για χιλιάδες χρόνια. Είναι επομένως πολύ σημαντικό να υπάρχει αποτελεσματική διαχείριση αυτών των αποβλήτων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αξίζει να αναφερθούν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που αποφεύγονται μέσω της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 1, όπου συγκεκριμένα αναφέρεται το αέριο (CCS). Η γεωλογική αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα αποτελεί ένα ιδιαίτερο μέρος της τεχνολογίας της δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα (Carbon Capture and Storage, CCS).



Πίνακας 1. Εκπομπές CO<sub>2</sub> που αποτρέπονται μέσω της χρήσης πυρηνικής ενέργειας (World Nuclear Association, 2018)

	Εκπομπές κύκλου ζωής (gCO <sub>2</sub> eq / kWh)	Εκτιμώμενες εκπομπές για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 2710 TWh (εκατομμύρια τόνοι CO <sub>2</sub> )	Πιθανές εκπομπές αποφεύγονται μέσω της χρήσης πυρηνικής ενέργειας (εκατομμύρια τόνοι CO <sub>2</sub> )	Πιθανές εκπομπές αποφεύγονται μέσω της χρήσης πυρηνικών
<b>Πυρηνική ενέργεια</b>	12	32	NA	NA
<b>Αέριο (CCS)</b>	490	1330	1298	c. 250
<b>Γαιάνθρακας</b>	820	2220	2188	c. 400

Η έννοια των πυρηνικών αποβλήτων χρησιμοποιείται για να αναφέρεται στη σειρά των υποπροϊόντων, που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνει χώρα σε πυρηνικούς σταθμούς. Τα απόβλητα, στα οποία περιλαμβάνονται επίσης τα απόβλητα που παράγονται από πυρηνικά εργοστάσια, εξακολουθούν να είναι ραδιενεργά και μετά τη χρήση του αρχικού υλικού και απαιτούν ιδιαίτερη διαχείριση. Αυτό που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι τα πυρηνικά απόβλητα υφίστανται την πίεση ενός διπλού στίγματος: είναι απόβλητα και είναι ραδιενεργά λόγω της πυρηνικής τους προέλευσης. Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι αυτά τα απόβλητα είναι ραδιενεργά, πρέπει να απορριφθούν με συγκεκριμένο τρόπο για λόγους ασφαλείας (Bergmans et al., 2008).

Τα ραδιενεργά απόβλητα προέρχονται από τις εργασίες του κύκλου πυρηνικών καυσίμων, αλλά και από την εξόρυξη υλικών που απαιτούνται για την τροφοδοσία πυρηνικών σταθμών, καθώς τα απόβλητα δεν είναι ομοιογενή σε ότι αφορά την

ποσότητά τους και τη σύστασή τους. Για παράδειγμα, το αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο θεωρείται τύπος ραδιενεργών αποβλήτων, όπως επίσης και ο μολυσμένος εξοπλισμός προστασίας (πχ ρούχα και παπούτσια) που χρησιμοποιείται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, παρά τις διαφορές στη φυσική εκδήλωση αυτού του τύπου αποβλήτων, τα απόβλητα από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, λόγω της ραδιενέργειας που περιέχεται σε αυτά, είναι πολύ επικίνδυνα για τον άνθρωπο και τη βιόσφαιρα γενικά. Ακριβώς όπως τα ραδιενεργά απόβλητα είναι μια ετερογενής ομάδα ύλης που θεωρείται απόβλητο, οι πηγές ή οι δραστηριότητες στις οποίες παράγονται αυτά τα απόβλητα, ποικίλουν επίσης (Bergmans et al., 2008).

Τα ραδιενεργά απόβλητα εμφανίζονται σε κάθε στάδιο του κύκλου πυρηνικών καυσίμων, που αφορούν στην διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά υλικά. Ο κύκλος καυσίμου περιλαμβάνει την εξόρυξη και την επεξεργασία του μεταλλεύματος ουρανίου, και τον εμπλουτισμό του σε πυρηνικά καύσιμα, τη χρήση του στον αντιδραστήρα, την επεξεργασία του χρησιμοποιημένου καυσίμου που λαμβάνεται από τον αντιδραστήρα μετά τη χρήση και τέλος, την απόρριψη των αποβλήτων. Ο κύκλος καυσίμου περιγράφεται συχνά από δύο μέρη - το «εμπρόσθιο άκρο» που εκτείνεται από την εξόρυξη έως τη χρήση ουρανίου στον αντιδραστήρα - και το «οπίσθιο άκρο» που καλύπτει την αφαίρεση χρησιμοποιημένου καυσίμου από τον αντιδραστήρα και την επακόλουθη επεξεργασία και διάθεση του (Choudhury & Bhattacharyya, 2016).

Τα απόβλητα από το εμπρόσθιο άκρο του κύκλου πυρηνικών καυσίμων είναι συνήθως απόβλητα, που εκπέμπουν άλφα ακτινοβολία και προέρχονται από την εξόρυξη ουρανίου. Περιέχει, επίσης, το στοιχείο ράδιο (Ra) και προϊόντα αποσύνθεσης. Το συμπύκνωμα διοξειδίου του ουρανίου ( $UO_2$ ) που προέρχεται από την εξόρυξη δεν χαρακτηρίζεται ως πολύ ραδιενεργό. Εξευγενίζεται σε  $U_3O_8$  και στη συνέχεια μετατρέπεται σε αέριο εξαφθοριούχο ουράνιο ( $UF_6$ ). Ως αέριο, υποβάλλεται σε εμπλουτισμό για την αύξηση της περιεκτικότητας σε U-235 από 0,7% σε περίπου 44% (Low Enriched Uranium - LEU). Στη συνέχεια μετατρέπεται σε σκληρό κεραμικό οξείδιο ( $UO_2$ ) για παραγωγή των στοιχείων (ράβδων) καυσίμου αντιδραστήρα. Το κύριο υποπροϊόν εμπλουτισμού είναι το απεμπλουτισμένο ουράνιο (Depleted Uranium - DU), το οποίο αποτελείται κυρίως από το ισότοπο U-238, με

περιεκτικότητα σε U-235 περίπου 0. 3%. Αποθηκεύεται, είτε ως  $UF_6$  είτε ως  $U_3O_8$ . Γενικά το U χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η εξαιρετικά υψηλή πυκνότητά του το καθιστά πολύτιμο, όπως οι καρίνες των σκαφών αναψυχής και τα αντιαρματικά κελύφη. Χρησιμοποιείται επίσης με πλουτώνιο για την παραγωγή καυσίμου μικτού οξειδίου (MOX) και για την αραίωση, ή ανάμιξη, πολύ εμπλουτισμένου ουρανίου από αποθέματα όπλων που ανακατευθύνεται για καύσιμο αντιδραστήρα (Choudhury & Bhattacharyya, 2016).

Το οπίσθιο άκρο του κύκλου πυρηνικών καυσίμων, που αποτελείται κυρίως από ράβδους αναλωμένου καυσίμου, περιέχει προϊόντα σχάσης που εκπέμπουν ακτινοβολία βήτα και γάμμα, και σωματίδια που εκπέμπουν σωματίδια άλφα, όπως το ουράνιο-234, το ουράνιο-238, το πλουτώνιο-238 και το αμερίκιο-241, και ακόμη και μερικές φορές εκπομπές νετρονίων, όπως το Καλιφόρνιο - californium (Cf). Αυτά τα ισότοπα δημιουργούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες (Choudhury & Bhattacharyya, 2016).

Το χρησιμοποιημένο καύσιμο περιέχει τα εξαιρετικά ραδιενεργά προϊόντα σχάσης. Αυτά τελικά αυξάνονται σε ένα επίπεδο, όπου απορροφούν τόσα πολλά νετρόνια που σταματά η αλυσιδωτή αντίδραση, ακόμη και με τις ράβδους ελέγχου να αφαιρούνται εντελώς. Σε αυτό το σημείο το καύσιμο πρέπει να αντικατασταθεί στον αντιδραστήρα με νέο καύσιμο, παρόλο που υπάρχει ακόμη σημαντική ποσότητα ουρανίου-235 και πλουτωνίου. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αυτό το χρησιμοποιημένο καύσιμο αποθηκεύεται, ενώ σε χώρες όπως η Ρωσία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία, η Ιαπωνία και η Ινδία, το καύσιμο επανεπεξεργάζεται για την αφαίρεση των προϊόντων σχάσης και το καύσιμο μπορεί στη συνέχεια να επαναχρησιμοποιηθεί. Εάν το χρησιμοποιημένο καύσιμο επανεπεξεργαστεί τότε διαλύεται και διαχωρίζεται χημικά σε διαλύματα ουρανίου, πλουτωνίου και αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Περίπου το 97% του χρησιμοποιημένου καυσίμου μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και μόνο το 3% απορρίπτεται ως απόβλητα υψηλού επιπέδου. Το ανακυκλώσιμο τμήμα είναι ως επί το πλείστον απεμπλουτισμένο ουράνιο με λιγότερο από 1% U-235, μαζί με ελάχιστο πλουτώνιο, το οποίο είναι πολύτιμο.

Μια άλλη σημαντική μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων είναι η στερεοποίηση. Τα υγρά απόβλητα υψηλού επιπέδου μετατρέπονται σε στερεά, αναμιγνύονται με υλικά

σχηματισμού γυαλιού, τήκονται και χυτεύονται σε ανθεκτικά δοχεία από ανοξείδωτο χάλυβα τα οποία στη συνέχεια σφραγίζονται με συγκόλληση. Μια άλλη μέθοδος ακινητοποίησης ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου είναι γνωστή ως «SYNROC», όπου τα ραδιενεργά απόβλητα ενσωματώνονται στα κρυσταλλικά πλέγματα των φυσικώς σταθερών ορυκτών σε ένα «synthetic rock- συνθετικό πέτρωμα». Η τελική απόρριψη αποβλήτων υψηλού επιπέδου διαρκεί για 40-50 χρόνια, έτσι ώστε η ραδιενέργειά τους να εξασθενήσει, παραμένει λιγότερο από το ένα χιλιοστό της αρχικής ραδιενέργειας και είναι πολύ πιο εύκολο να διαχειριστούν. Τα δοχεία υαλοποιημένων αποβλήτων, ή συγκροτήματα χρησιμοποιημένων καυσίμων, αποθηκεύονται κάτω από το νερό σε ειδικές λίμνες, ή σε κατασκευές ξηρού σκυροδέματος ή βαρέλια, για τουλάχιστον 50 χρόνια. Η τελική απόρριψη υαλοποιημένων αποβλήτων, ή χρησιμοποιημένων συγκροτημάτων καυσίμου χωρίς επανεπεξεργασία, απαιτεί την απομόνωσή τους από το περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η πλέον κοινή μέθοδος είναι να ταφούν σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς βάθους τουλάχιστον 500 μέτρων. Αφού θαφτεί για περίπου 1000 χρόνια, το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας θα έχει αποσυντεθεί. Η ποσότητα της ραδιενέργειας που απομένει τότε θα είναι παρόμοια με εκείνη της αντίστοιχης ποσότητας του αρχικού μεταλλεύματος ουρανίου από την οποία προήλθε (Choudhury & Bhattacharyya, 2016).

Τα ραδιενεργά απόβλητα προέρχονται από διαφορετικούς τύπους δραστηριοτήτων. Το πιο σημαντικό είναι η πυρηνική ενέργεια, που παράγεται στη διαδικασία εμπλουτισμού ουρανίου, κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (αναλωμένο καύσιμο όταν δεν επανεπεξεργάζεται), στην επανεπεξεργασία αναλωμένου καυσίμου (προϊόντα σχάσης) ή στον παροπλισμό πυρηνικών σταθμών (εξαρτήματα χάλυβα). Επιπλέον, οι χώρες παράγουν επίσης ραδιενεργά απόβλητα σε άλλες δραστηριότητες που δεν σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, όπως η εργαστηριακή έρευνα ή η πυρηνική ιατρική σε νοσοκομεία. Τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγονται από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, διάφορα ιατρικά κέντρα, ερευνητικούς οργανισμούς και βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ραδιενεργό υλικό απαιτούν μακροπρόθεσμο σχέδιο διαχείρισης (Hosan, 2018).

Το κύριο πρόβλημα με αυτά τα απόβλητα είναι ότι είναι ραδιενεργά, αλλά δεν είναι όλα τα απόβλητα εξίσου ραδιενεργά. Η ραδιενέργεια μετράται σε αποσύνθεση ανά δευτερόλεπτο και η μονάδα μέτρησης είναι το Becquerel (Bq) (*Becquerel (Bq) | NRC.Gov, n.d.*). Για την ταξινόμηση των αποβλήτων, χρησιμοποιούνται δύο συνδυασμοί μονάδων μέτρησης, ήτοι Bq / g ή TBq / m<sup>3</sup>. Αυτό μας επιτρέπει να ταξινομήσουμε τα απόβλητα για να σχεδιάσουμε τις μεθόδους διάθεσης/απόρριψης πιο αποτελεσματικά. Για τη διάθεση, ωστόσο, είναι επίσης αξιοσημείωτο να ληφθούν υπόψη οι ημιζωές των ραδιονουκλεϊδίων των αποβλήτων. Τα ραδιονουκλεϊδία είναι ασταθή στοιχεία που μπορούν να βρεθούν στα απόβλητα και απελευθερώνουν ενέργεια λόγω της αστάθειας του πυρήνα τους. Όταν αποσυντίθενται, αυτά τα ραδιονουκλεϊδία εκπέμπουν ακτινοβολία η οποία θεωρείται επιβλαβή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Στα πυρηνικά απόβλητα, αναφέρονται ραδιονουκλεϊδία με χρόνο ημιζωής<sup>2</sup> μερικών ημερών (πχ ιώδιο-131) ή εκατομμύρια χρόνια (π.χ. ιώδιο-129). Επομένως, ο χρόνος ημιζωής των ραδιονουκλεϊδίων που βρίσκονται στα απόβλητα θα διαφοροποιείται μεταξύ των διαφόρων τύπων αποβλήτων.

Η ροή κύριων αποβλήτων προέρχεται από το τελευταίο στάδιο του κύκλου καυσίμου: το ίδιο το αναλωμένο καύσιμο μπορεί να θεωρηθεί απόβλητο, εάν δεν προβλέπεται καμιά μεταγενέστερη χρήση για αυτό. Εάν το αναλωμένο καύσιμο επανεπεξεργαστεί, παράγονται απόβλητα διεργασίας. Ο αντίστοιχος όγκος είναι σχετικά μικρός: η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος 1 GW κατά τη διάρκεια ενός έτους με ένα τυπικό LWR (light-water-reactor) παράγει 5m<sup>3</sup> αποβλήτων μεσαίας δραστηριότητας μακράς διάρκειας και 2,5m<sup>3</sup> γυαλιού μεγάλης διάρκειας (εάν επεξεργάζεται) ή 40m<sup>3</sup> αναλωμένου καυσίμου (εάν δεν υπάρχει επεξεργασία). Τα τεχνολογικά απόβλητα παράγονται σε μικρές ποσότητες κατά τη διάρκεια των εργασιών μετατροπής, εμπλουτισμού και κατασκευής καυσίμων. Αποτελείται κυρίως από στερεά απόβλητα (ρητίνη ανταλλαγής ιόντων ή απόβλητα από την αποσυναρμολόγηση εγκαταστάσεων) και υγρά απόβλητα (απόβλητα απολύμανσης, χρησιμοποιημένοι διαλύτες και υγρά σπινθηρισμού που χρησιμοποιούνται για ανάλυση). Μια άλλη ροή αποβλήτων προέρχεται από την αποσυναρμολόγηση πυρηνικών εγκαταστάσεων. Αποτελείται από χάλυβες και περιττά μέρη σκυροδέματος που περιέχουν προϊόντα

---

<sup>2</sup> Χρόνος ημιζωής: Περίοδος αντίδρασης της μισής ποσότητας των ενεργών αντιδρώντων σε περίπτωση χημικής ή πυρηνικής αντίδρασης.

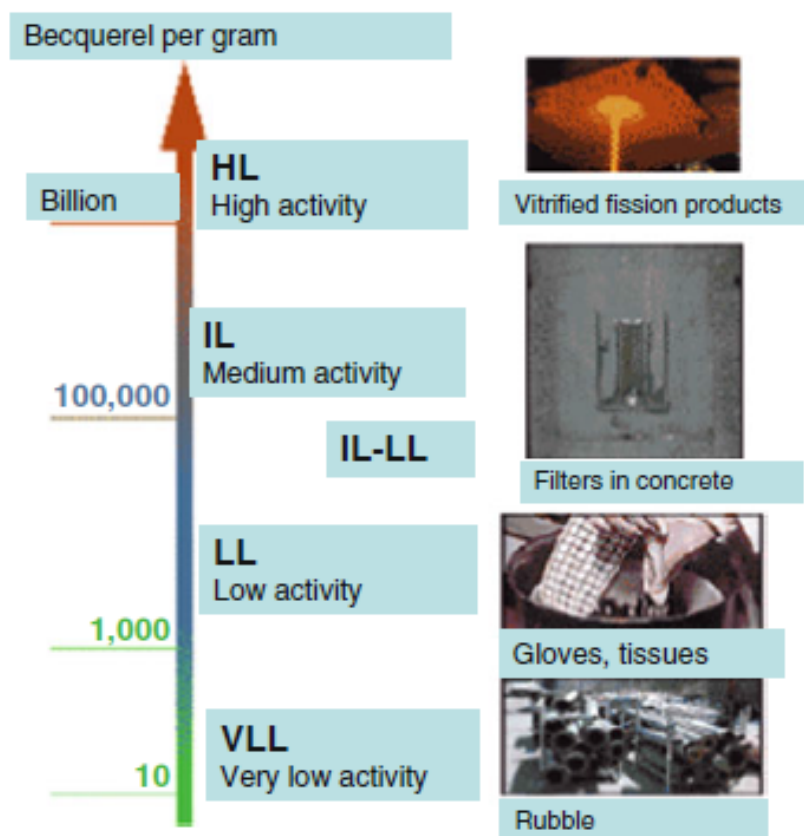
ενεργοποίησης. Για παράδειγμα η διάλυση του σύγχρονου γαλλικού πυρηνικού στόλου (58 αντιδραστήρες) θα δώσει 80 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων πολύ χαμηλού επιπέδου. Το ραδιενεργό περιεχόμενο των πυρηνικών αποβλήτων είναι ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερες προφυλάξεις για τη διαχείρισή του (Cacuci, 2010).

Συνήθως, τα ραδιενεργά απόβλητα ταξινομούνται με βάση δύο κριτήρια: τη δραστηριότητά τους και το χρόνο ημιζωής των ραδιονουκλεϊδίων που περιέχουν (Εικόνες 4 και 5).

*Εικόνα 4. Ταξινόμηση αποβλήτων. Τα όρια ραδιενέργειας που δίνονται είναι ενδεικτικά και μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα (Cacuci, 2010)*

		Short life (SL) Period < 30 years	Long life (LL) Period > 30 years
< A few $10^5$ Bq/kg	Very low level (VLL)	VLL	
< A few $10^8$ Bq/kg ( $\beta\gamma$ ) < A few $10^6$ Bq/kg ( $\alpha$ )	Low level (LL)	LIL-SL	LL-LL
< A few $10^{11}$ Bq/kg ( $\beta\gamma$ )	Intermediate level (IL)		IL-LL
$10^{13}$ Bq/kg ( $\beta\gamma$ ) $10^{11}$ Bq/kg ( $\alpha$ )	High level (HL)	HL	

Εικόνα 5. Φύση και ταξινόμηση των αποβλήτων (Cacuci, 2010)



Πρόσθετα παρατίθενται οι ορισμοί των χαρακτηρισμών των υλικών που πληρούν τις προϋποθέσεις ταξινόμησης αποβλήτων (Lowenthal, 1997).

### Ειδικό πυρηνικό υλικό (Special Nuclear Material - SNM)

(1) πλουτώνιο, ουράνιο εμπλουτισμένο στο ισότοπο 233 ή στο ισότοπο 235, και οποιοδήποτε άλλο υλικό για το οποίο η Επιτροπή Ενέργειας των ΗΠΑ, σύμφωνα με τις διατάξεις του τμήματος 2071 του [άρθρου 42 του U.S. Code], καθορίζει ότι είναι ειδικό πυρηνικό υλικό, αλλά δεν περιλαμβάνει το αρχικό υλικό ή

(2) οποιοδήποτε υλικό εμπλουτίζεται τεχνητά σε οποιοδήποτε από τα προηγούμενα ισότοπα, αλλά δεν περιλαμβάνει το αρχικό υλικό.

### **Υλικό - Material**

Υλικό που είναι απαραίτητο για την παραγωγή ειδικών πυρηνικών υλικών:

(1) ουράνιο, θόριο ή οποιοδήποτε άλλο υλικό που καθορίζεται από την Επιτροπή σύμφωνα με τις διατάξεις του τμήματος 2091 του [άρθρου 42 του U.S. Code] ή

(2) μεταλλεύματα που περιέχουν ένα ή περισσότερα από τα προαναφερθέντα στοιχεία-ισότοπα, σε συγκέντρωση που η Επιτροπή μπορεί με κανονισμό να καθορίζει κατά καιρούς.

### **Υλικό υποπροϊόντος**

Παραδείγματα υλικού υποπροϊόντος είναι το τρίτιο (υδρογόνο-3), ο άνθρακας-14, το φθόριο-18, το κρυπτό-87, το κοβάλτιο-57 και οι διακριτές πηγές ραδίου-226.

### **Υπερουρανικό υλικό (Transuranic waste - TRU)**

Υλικό που περιέχει ή έχει μολυνθεί με στοιχεία που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 92.

### **Υλικά με χειρισμό επαφής (contact-handled - CH)**

Υλικά ή συσκευασίες με επιφανειακό ρυθμό έκθεσης <200mR / h μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς θωράκιση για τους εργαζόμενους σε ότι αφορά την ακτινοβολία.

### **Υλικά απομακρυσμένου χειρισμού (remote-handled - RH)**

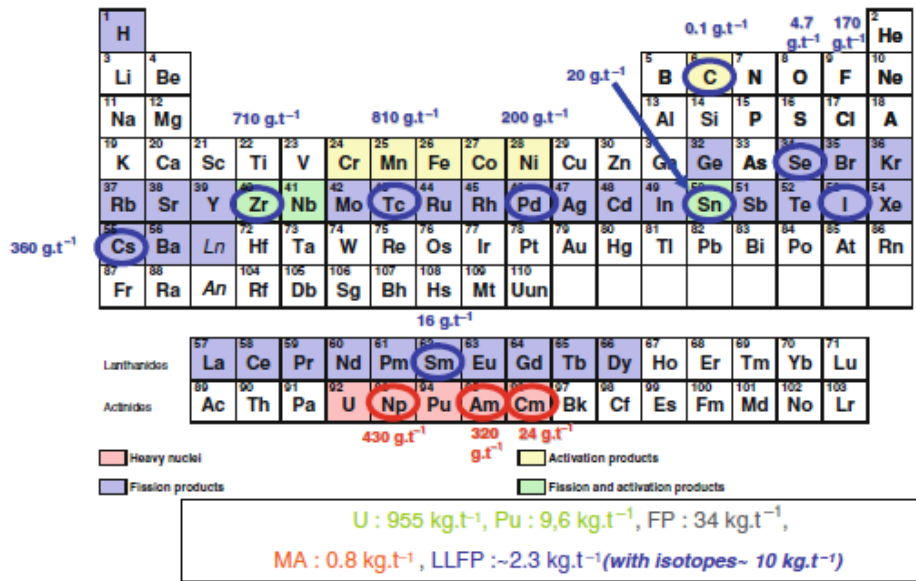


Υλικά ή συσκευασίες με ρυθμό έκθεσης στην επιφάνεια > 200mR / h πρέπει να χειρίζονται εξ αποστάσεως για την προστασία των εργαζομένων στην ακτινοβολία.

### **Επικίνδυνα απόβλητα (Μικτά απόβλητα, MW)**

Τα μικτά απόβλητα, ή MW, περιέχουν επικίνδυνα απόβλητα, όπως ορίζονται από τον νόμο για την προστασία και ανάκτηση πόρων, και ραδιενεργά απόβλητα, όπως ορίζονται από τον νόμο περί ατομικής ενέργειας. Υπάρχουν μικτά απόβλητα υψηλού επιπέδου, μικτά απόβλητα χαμηλού επιπέδου και μικτά απόβλητα TRU.

*Εικόνα 6. Μετασχηματισμός του πυρηνικού καυσίμου κατά την παραμονή του σε αντιδραστήρα LWR. Το καύσιμο των αντιδραστήρων ελαφρού νερού, που αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου πυρηνικού στόλου, είναι εμπλουτισμένο ουράνιο, με αναλογία εμπλουτισμού της τάξης του 3-5%. Αυτό το διάγραμμα δείχνει την πορεία 1000 ατόμων ουρανίου (965 άτομα του U238 και 35 σχάσιμα άτομα του U235) που υπάρχουν στο αρχικό πυρηνικό καύσιμο. Μια ράβδος καυσίμου μένει περίπου 4 χρόνια στον αντιδραστήρα. Στην έξοδο, το αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο εξακολουθεί να περιέχει 939 άτομα U238 και 11 άτομα U235, συν προϊόντα σχάσης, ισότοπα πλουτωνίου και μια μικρή ποσότητα βαρύτερων νουκλεϊδίων (Cacuci, 2010).*



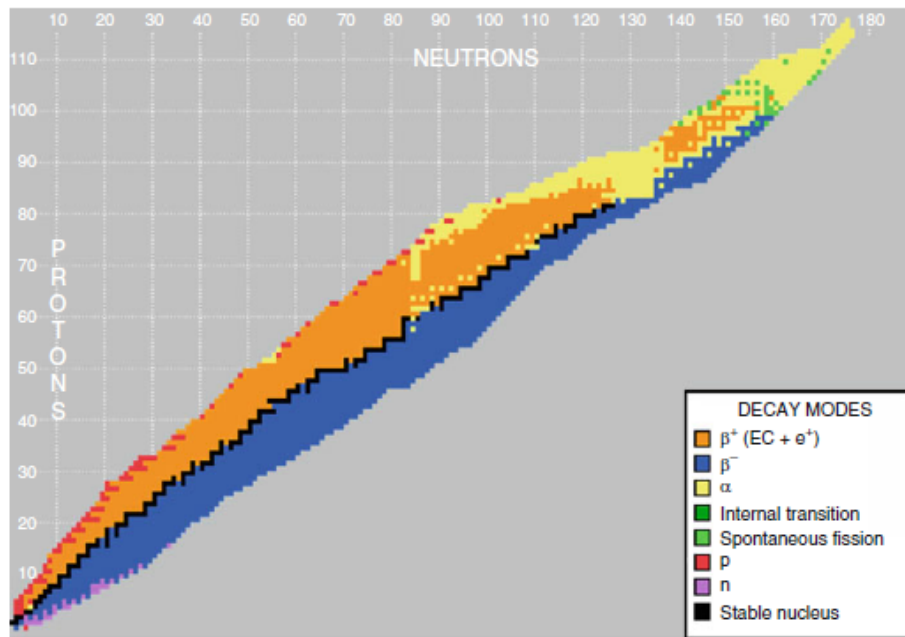
Η σταθερότητα των ατόμων ουρανίου επηρεάζει τον τύπο ραδιενέργειας και γι' αυτό το λόγο μπορεί να παρουσιάζεται διαφορετική τοποθέτησή τους. Ο πυρήνας του ουρανίου πλησιάζει εγγύτερα στον πυθμένα σε όλους τους τρόπους αποσύνθεσης. Για παράδειγμα, οι πυρήνες με περίσσεια νετρονίων μετατρέπονται μέσω μιας διαδικασίας της ραδιενέργειας βήτα, η οποία μετατρέπει ένα από τα νετρόνια τους σε πρωτόνιο. Αυτή είναι η περίπτωση των προϊόντων σχάσης.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι αυτό της μείωσης της μάζας των προϊόντων της αυθόρμητης σχάσεως μερικών βαρέων πυρήνων λόγω της ραδιενέργειας άλφα με επακόλουθη μείωση του αριθμού των νουκλεονίων. Αυτή είναι η περίπτωση των σωματιδίων, τα οποία είναι κυρίως άλφα πομποί. Τα σωματίδια άλφα ( $\alpha$ ) είναι σύνθετα σωματίδια που αποτελούνται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια συνδεδεμένα μεταξύ τους. Εκπέμπονται από τον πυρήνα ορισμένων ραδιονουκλεϊδίων κατά τη διάρκεια μιας μορφής ραδιενεργού αποσύνθεσης, που ονομάζεται άλφα-αποσύνθεση. Φυσικά, αυτή η εκπομπή σωματιδίων αφήνει γενικά τον θυγατρικό πυρήνα σε μία συγκεκριμένη κατάσταση. Η επιστροφή στη θεμελιώδη κατάσταση συνεπάγεται την εκπομπή γάμμα φωτονίων. Είναι σημαντικό να

σημειωθεί η σειρά μεγέθους της ενέργειας που εκπέμπεται από αυτές τις ραδιενεργές αποσυνθέσεις:

- Ένα σωματίδιο άλφα εκπέμπει/εκλύει περίπου 5MeV
- Τα σωματίδια βήτα και γάμμα απομακρύνουν/καταναλώνουν ένα κλάσμα του MeV (Cacuci, 2010).

Εικόνα 7. Λειτουργίες ραδιενεργού αποσύνθεσης. Όπως διαφαίνεται και στο διάγραμμα, οι τύποι ραδιενέργειας είναι διαφορετικοί για κάθε πυρήνα. Για παράδειγμα οι πυρήνες με περίσσεια νετρονίων αποσυντίθενται κυρίως μέσω της διαδικασίας της βήτα ραδιενέργειας, η οποία μετατρέπει ένα από τα νετρόνιά τους σε πρωτόνιο. (Cacuci, 2010)



Η ταξινόμηση των πυρηνικών αποβλήτων διαφέρει από χώρα σε χώρα, αλλά μετά από αρκετές δεκαετίες, έχουν διαμορφωθεί κάποιες βασικές μέθοδοι ταξινόμησης (Liu & Dai, 2019):

- i. Με βάση το στοιχείο πχ Ac, Th, Pa, U, Np, Pu κ.λπ.
- ii. Με βάση το επίπεδο ραδιενέργειας: απόβλητα υψηλού επιπέδου, αναλωμένα καύσιμα, απόβλητα μεσαίου επιπέδου, απόβλητα χαμηλού επιπέδου και απόβλητα εξαιρετικά χαμηλού επιπέδου
- iii. Με βάση τη μορφή των ραδιενεργών αποβλήτων: ραδιενεργά αέρια απόβλητα, ραδιενεργά υγρά απόβλητα και ραδιενεργά στερεά απόβλητα

- iv. Απόβλητα ουρανίου και γενικά απόβλητα ανάλογα με το εάν τα ραδιενεργά απόβλητα περιέχουν σωματίδια E και ο χρόνος ημιζωής είναι άνω των 20 ετών.

Η ετερογένεια των ραδιενεργών αποβλήτων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Προέρχεται από το γεγονός ότι τα ραδιενεργά απόβλητα παράγονται από διαφορετικές πηγές και σε διαφορετικές μορφές. Επομένως, τα ραδιενεργά απόβλητα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με πολλά κριτήρια, όπως τα ακόλουθα.

- Δυνάμει της προέλευσης: εξόρυξη ουρανίου, εμπλουτισμός ουρανίου, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικούς σταθμούς, επανεπεξεργασία καυσίμων, παροπλισμός πυρηνικών εγκαταστάσεων, παλαιά απόβλητα ή μη πυρηνικά απόβλητα από νοσοκομεία ή από έρευνα σε εργαστήρια.
- Δυνάμει της φυσικής κατάστασης εκδήλωσης: υγρή, αέρια ή στερεά κατάσταση.
- Δυνάμει των ιδιοτήτων τους: συμπαγή, καύσιμο, επανεπεξεργάσιμο υλικό, μεταξύ άλλων.

Επιπλέον, η ταξινόμηση των πυρηνικών αποβλήτων μπορεί να εξαρτάται από τα επιλεγμένα κριτήρια, αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και νομικό πλαίσιο της χώρας στην οποία γίνεται η αναφορά. Ωστόσο, ο Παγκόσμιος Οργανισμός για την Πυρηνική Ενέργεια - International Atomic Energy Agency (IAEA) έχει συμβάλει στον καθορισμό των τύπων ραδιενεργών αποβλήτων με βάση τα Πρότυπα Ασφαλείας του. Στον οδηγό ασφαλείας του Παγκόσμιου Οργανισμού για την Πυρηνική Ενέργεια, ορίζει έξι διαφορετικούς τύπους αποβλήτων λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα δραστηριότητάς του και τον χρόνο ημιζωής των ραδιονουκλεϊδίων του (IAEA, 2009).

- **Exempt waste (EW) - Απαλλασσόμενα απόβλητα.** Λόγω της μικρής συγκέντρωσης ραδιονουκλεϊδίων, τα απαλλασσόμενα απόβλητα καθαρίζονται κατά τον ρυθμιστικό έλεγχο. Δεν απαιτούνται ειδικές διατάξεις για την εξασφάλιση της ακτινοπροστασίας και ως εκ τούτου μπορεί να απορριφθεί σε συμβατικούς χώρους υγειονομικής ταφής ή να ανακυκλωθεί κατά βούληση.
- **Very short lived waste (VSLW) - Απόβλητα με εξαιρετικά μικρό χρόνο ημιζωής.** Τα συγκεκριμένα απόβλητα περιέχουν μόνο ραδιονουκλεϊδία με πολύ

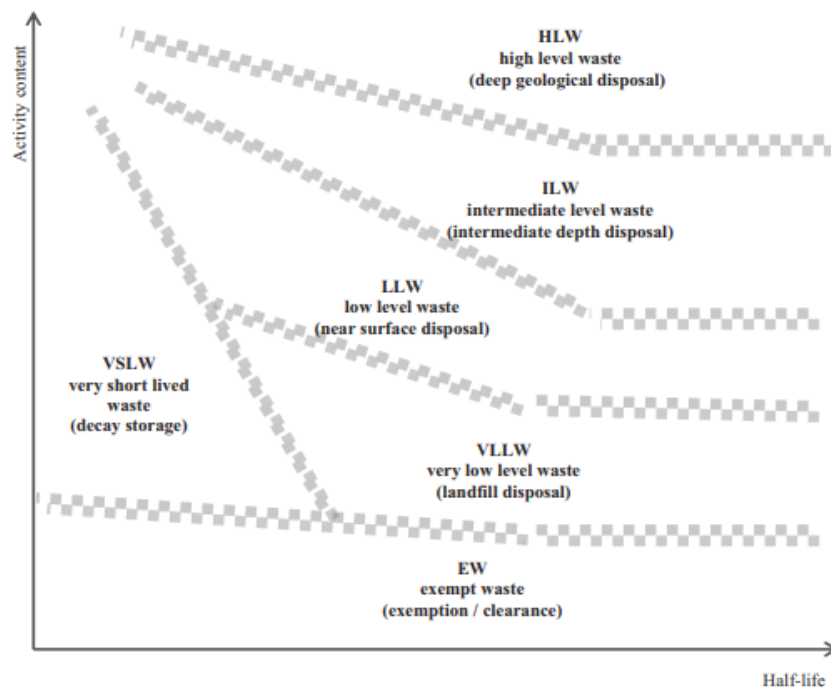
μικρό χρόνο ημιζωής. Επομένως, δεν μπορούν να απορριφθούν άμεσα ως συμβατικά απόβλητα, αλλά μπορούν μετά την αποθήκευσή τους έως ότου η ραδιενέργεια μειωθεί κάτω από τα επίπεδα που απαιτούνται.

- **Very low level waste (VLLW) – Απόβλητα πολύ χαμηλού επιπέδου.** Αφορούν σε απόβλητα που απαιτείται χαμηλό επίπεδο περιορισμού και υψηλές προδιαγραφές απόρριψης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται περιορισμένος ρυθμιστικός έλεγχος.
- **Low level waste (LLW) - Απόβλητα χαμηλού επιπέδου.** Τα απόβλητα χαμηλού επιπέδου αφορούν απόβλητα που δεν μπορούν να απορριφθούν άμεσα, αλλά έχουν περιορισμένες ποσότητες ραδιονουκλεϊδίων μακράς διάρκειας ζωής, επομένως είναι πιο απαιτητικά από τα απόβλητα πολύ χαμηλού επιπέδου όσον αφορά τον περιορισμό και την απομόνωση. Αυτό μπορεί να διαρκέσει έως μερικές εκατοντάδες χρόνια, αλλά στη συνέχεια, τα απόβλητα χαμηλού επιπέδου μπορούν να απορριφθούν σε συμβατικές εγκαταστάσεις κοντά στην επιφάνεια.
- **Intermediate level waste (ILW) - Απόβλητα ενδιάμεσου επιπέδου.** Επειδή περιέχουν περιορισμένες συγκεντρώσεις μακρόβιων ραδιονουκλεϊδίων απαιτείται απόρριψη με εναπόθεση σε υπόγεια εγκατάσταση σε βάθη της τάξης των δεκάδων έως εκατοντάδων μέτρων.
- **High level waste (HLW) - Απόβλητα υψηλού επιπέδου.** Περιέχουν τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις ραδιονουκλεϊδίων βραχείας και μακράς διάρκειας ζωής, που απαιτούν μεγαλύτερο επίπεδο περιορισμού και απομόνωσης, ειδικά για τη διασφάλιση μακροπρόθεσμης ασφάλειας. Είναι το πιο απαιτητικό είδος αποβλήτων σε ότι αφορά τη διαχείρισή τους, παρόλο που δεν είναι το πιο άφθονο. Αυτό συμβαίνει επειδή, ενώ τα απόβλητα υψηλού επιπέδου αντιπροσωπεύουν μόνο το 3% του συνολικού αποθέματος ραδιενεργών αποβλήτων, συγκεντρώνουν περίπου το 99,8% της συνολικής ραδιενέργειας που βρίσκεται στα απόβλητα (Balaguer, 2019).

Αυτή είναι μια ευρέως αποδεκτή ταξινόμηση των πυρηνικών αποβλήτων, αλλά η σημασία της βασίζεται στο γεγονός ότι προτείνονται από τον ΙΑΕΑ και τους κανονισμούς ασφαλείας τους. Αυτό σημαίνει ότι, παρόλο που ο ΙΑΕΑ δεν διαθέτει τη δυναμική για να επιβάλει αυτή την ταξινόμηση στα κράτη μέλη του, οι χώρες

συνήθως την ακολουθούν όταν καταρτίζουν τη στρατηγική τους για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Παρ' όλα αυτά, τα όρια μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών μπορούν να χαρακτηριστούν ως μη διακριτά και επαρκώς καθορισμένα από την μία κατηγορία στην άλλη και παρατηρείται ότι τα λεπτομερή ποσοτικά όρια μπορούν να αναπτυχθούν από τους εθνικούς κανονισμούς της εκάστης χώρας (IAEA, 2009). Στην συνέχεια παρουσιάζεται στο σύστημα ταξινόμησης πυρηνικών αποβλήτων στην Εικόνα 8.

Εικόνα 8. Απεικόνιση του συστήματος ταξινόμησης αποβλήτων. Αποτυπώνεται η δραστικότητα σε συνάρτηση με το χρόνο ημιζωής για κάθε κατηγορία πυρηνικού αποβλήτου. (IAEA, 2009)



Πίνακας 2. Απογραφή πυρηνικών αποβλήτων (World Nuclear Association, 2018)

	<b>Στερεά ραδιενεργά απόβλητα κατά την αποθήκευση (m3)</b>	<b>Στερεά ραδιενεργά απόβλητα προς διάθεση (m3)</b>	<b>Ποσοστό τύπου αποβλήτων προς διάθεση</b>
<b>VLLW</b>	2,356,000	7,906,000	77%
<b>LLW</b>	3,479,000	20,451,000	85%
<b>ILW</b>	460,000	107,000	19%
<b>HLW</b>	22,000	0	0%



---

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### *Ιστορική αναδρομή διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων*

---

Από τα πρώτα χρόνια της πυρηνικής βιομηχανίας, η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων ήταν μια πρόκληση που αντιμετώπισαν οι χώρες και δεν έχουν βρεθεί ακόμη ιδανικές λύσεις, ειδικά για την αντιμετώπιση των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Από όλα τα πυρηνικά απόβλητα που παράγονται, τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλού επιπέδου αφορούν στο μικρότερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής, αλλά ταυτόχρονα και στα πιο επικίνδυνα όσον αφορά την εκπεμπόμενη ραδιενέργεια.

Η μείωση των πηγών αποβλήτων ή απορριμμάτων, που αναφέρεται και ως πρόληψη, περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την κατασκευή, την αγορά ή τη χρήση διαφόρων υλικών, όπως για παράδειγμα προϊόντα και συσκευασίες, έτσι ώστε οι ποσότητες ή η τοξικότητα των αποβλήτων να μειώνονται σημαντικά πριν εισέλθουν στο εκάστοτε σύστημα διαχείρισης. Οι διάφορες δραστηριότητες μείωσης των αποβλήτων και απορριμμάτων μπορούν να συντελέσουν και στη μείωση της αποθήκευσης, συλλογής, κόστους διάθεσης και πρόσθετων υποχρεώσεων, και αξίζει να αναφερθούν ενδεικτικά οι κάτωθι δραστηριότητες (Veracka & Bailey, 2000):

- Σχεδιασμός προϊόντων ή συσκευασιών για τη μείωση της ποσότητας ή της τοξικότητας των υλικών, που χρησιμοποιούνται ή για την εύκολη επαναχρησιμοποίησή τους
- Επαναχρησιμοποίηση υπαρχόντων προϊόντων ή συσκευασιών.
- Επιμήκυνση της χρήσης των προϊόντων
- Χρήση συσκευασιών που μειώνουν την αλλοίωση στο προϊόν
- Διαχείριση μη βιολογικών οργανικών αποβλήτων μέσω της λιπασματοποίησης επί τόπου ή άλλων εναλλακτικών λύσεων που αφορούν τη διάθεση

- Ορθή διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Κατά τα αρχαία χρόνια, τα στερεά απόβλητα αποτελούσαν τα υπολείμματα από το κυνήγι, τη συλλογή τροφής και την προετοιμασία του φαγητού. Όταν συσσωρεύονται απόβλητα, οι κάτοικοι μετακινούνται απλά σε μια νέα τοποθεσία. Οι φυσικές διεργασίες μικροβιακής αποσύνθεσης καθώς και ο νομαδικός τρόπος ζωής των ανθρώπων είχαν ως αποτέλεσμα ένα περισσότερο φυσικό τρόπο ζωής και την απουσία προβλημάτων που αντιπαλεύουν οι σύγχρονες κοινωνίες ήτοι η ατμοσφαιρική ρύπανση και η μόλυνση των υπόγειων υδάτων. Το 9000 π.Χ. περίπου, οι άνθρωποι άρχισαν να διαφοροποιούν τον τρόπο διαβίωσής τους δηλαδή τη νομαδική ζωή και να δημιουργούν μόνιμες κοινότητες. Οι ποσότητες αποβλήτων αυξήθηκαν και άρχισαν να συσσωρεύονται για μεγαλύτερες περιόδους. Ως αποτέλεσμα, τα απόβλητα έγιναν πιο επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία και για τα φυσικά περιβάλλοντα, γεγονός που οδήγησε σταδιακά στη διαχείριση των αποβλήτων, ακόμα και με πρακτικές που δεν ανήκουν σε πλήρως κατάλληλες περιβαλλοντικές πρακτικές όπως η καύση (Pichtel, 2014).

Η ανάλυση ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών για την προστασία της δημόσιας υγείας και της ασφάλειας από τους κινδύνους της έκθεσης σε ακτινοβολία είναι σε μεγάλο βαθμό ντετερμινιστική, δηλαδή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη της αιτιότητας και η νομοτελειακή συνάφεια του φαινομένου. Κατά τη διάρκεια του πρωτοποριακού πειράματος μιας αλυσιδωτής αντίδρασης ελεγχόμενης πυρηνικής σχάσης στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο το 1942, η έννοια της ασφάλειας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τους επιστήμονες με επικεφαλής τον Enrico Fermi. Εξετάζοντας την πιθανότητα αποτυχίας στις πειραματικές εγκαταστάσεις, σχεδίασαν πολλαπλά μέτρα προστασίας στο πείραμα για να προετοιμαστούν για το άγνωστο. Το πρώτο προστατευτικό δοχείο μολύβδου αποτελούνταν από δύο σκευάσματα ελέγχου ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένης μιας ράβδου ασφαλείας έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, ένα διάλυμα άλατος καδμίου παρασκευάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως ένα είδος «ομάδας ελέγχου υγρού» σε περίπτωση που αποτύχουν όλα τα χαρακτηριστικά μηχανικής ασφαλείας (Cacuci, 2010).

Στην πραγματικότητα, αυτές οι πολλαπλές διασφαλίσεις αντιπροσωπεύουν μια εφαρμογή του λεγόμενου σχεδιασμού φιλοσοφίας «άμυνας σε βάθος<sup>3</sup>» (DID) σε ότι αφορά το σχεδιασμό χαρακτηριστικών ασφαλείας για πυρηνικά εργοστάσια, αν και αυτή η ορολογία δεν είχε καθιερωθεί τότε. Το έργο Μανχάταν το οποίο διεξήγαγαν οι ΗΠΑ κατά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο περιελάμβανε διάφορους κλάδους: πειραματική και θεωρητική φυσική, χημική μηχανική, μηχανολογία και ηλεκτρολογία. Κάθε ομάδα έφερε διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής στο έργο. Οι χημικοί μηχανικοί της Du Pont Corporation καθοδήγησαν την προσπάθεια κατασκευής πολλών πυρηνικών αντιδραστήρων στην πόλη Χάνφορντ στην πολιτεία της Ουάσιγκτον. Αυτό δημιούργησε την έννοια της λειτουργικής και δομικής ανεξαρτησίας και αργότερα δημιούργησε μια φιλοσοφία ασφάλειας που εφαρμόζεται εκτενώς στον χώρο της πυρηνικής ενέργειας, δηλαδή «defense-in-depth / άμυνα σε βάθος» (Rhodes, 1988).

Η ίδια φιλοσοφία στο σχεδιασμό του πυρηνικού συστήματος ενέργειας προωθεί τη χρήση στρωμάτων και διαφορετικών ανεξάρτητων φραγμών (Η λέξη «φράγμα» σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιείται για να αναφέρεται σε εκείνες τις δομές, τα συστήματα, τα συστατικά και το λογισμικό και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις που μπορούν να ανιχνεύσουν, αποτρέψουν, προστατεύσουν, και μετριάσουν τους κινδύνους έκθεσης σε ακτινοβολία αλλά και τις συνέπειες τέτοιων κινδύνων) για την πρόληψη και τον περιορισμό της πιθανότητας απελευθέρωσης εξαιρετικά ραδιενεργών προϊόντων σχάσης στο περιβάλλον. Επειδή οι μηχανικοί της Du Pont δεν είχαν επαρκή εμπειρία σχετικά με την πυρηνική τεχνολογία, ενσωμάτωσαν πολλά χαρακτηριστικά ασφαλείας για να ξεπεράσουν τις αβεβαιότητες όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας των εμποδίων. Η συγκεκριμένη πρακτική οδήγησε σε μεγάλα περιθώρια ασφαλείας και σε συστήματα ασφαλείας που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίσουν την απελευθέρωση ραδιενεργών λυμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να μολύνουν το περιβάλλον.

Λίγο μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, παρατηρήθηκε σημαντικό ενδιαφέρον για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας σε ειρηνικές διεργασίες, δηλαδή που να μην προκαλούν άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο μέσω βίαιων χρήσεων, και

---

<sup>3</sup> defense-in-depth

προέκυψε η ανάγκη ρύθμισης των εφαρμογών πυρηνικής ενέργειας. Ο πυρηνικός κανονισμός ήταν ευθύνη της Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ (Atomic Energy Commission – AEC), μιας πενταμελούς Επιτροπής που το Κογκρέσο των Ηνωμένων Πολιτειών καθιέρωσε ως μέρος του Νόμου Ατομικής Ενέργειας του 1946 για να διατηρήσει τον αυστηρό έλεγχο της ατομικής τεχνολογίας και να την εκμεταλλευτεί περαιτέρω για στρατιωτικές εφαρμογές. Ο νόμος του 1946, ψηφίστηκε ενώ οι σχέσεις ΗΠΑ-Σοβιετικής Ένωσης ήταν τεταμένες με την έναρξη του Ψυχρού Πολέμου, και αναγνώρισε σιωπηρά τα πιθανά οφέλη της πυρηνικής ενέργειας σε ότι αφορά τη χρήση της σε περιόδους ειρήνης και ανεξάρτητα από στρατιωτικές χρήσεις. Τόνισε τις στρατιωτικές πτυχές της πυρηνικής ενέργειας και την ανάγκη μυστικότητας. Ο νόμος του 1954 τερμάτισε το μονοπώλιο της κυβέρνησης σε τεχνικά δεδομένα και κατέστησε την ανάγκη για εμπορική πυρηνική ενέργεια ως επείγοντα εθνικό στόχο για την προώθηση των ειρηνικών χρήσεων της ατομικής ενέργειας, παρέχοντας εύλογη διαβεβαίωση ότι τέτοιες χρήσεις δεν θα οδηγούσαν σε αδικαιολόγητους κινδύνους για την υγεία και την ασφάλεια του γενικού πληθυσμού. Ο θεμελιώδης στόχος της AEC στη σύνταξη κανονισμών ήταν να διασφαλιστεί ότι η δημόσια υγεία και ασφάλεια προστατεύονται χωρίς να επιβάλλονται υπερβολικά επαχθείς απαιτήσεις που θα εμπόδιζαν τη βιομηχανική ανάπτυξη. Τα τεχνικά ζητήματα και θέματα ασφάλειας που επακολούθησαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου περιελάμβαναν την επίδραση της ακτινοβολίας στις ιδιότητες των υλικών του αντιδραστήρα, την αντοχή του χάλυβα και άλλων μετάλλων υπό πίεση σε έναν αντιδραστήρα, τη διαδικασία με την οποία το νερό μπορεί να αντιδράσει με το ουράνιο, το θόριο, το αλουμίνιο και άλλα στοιχεία σε έναν αντιδραστήρα, και τα μέτρα που καθίστανται αναγκαία για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης σε ακτινοβολία σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος (Cacuci, 2010).

Η πυρηνική τεχνολογία είναι αποτέλεσμα του Ψυχρού Πολέμου (Rhodes, 1988) και της επακόλουθης σύγκρουσης μεταξύ των δυνάμεων της Δύσης και της Ανατολής (Guth et al., 2019). Υπό τις μεταπολεμικές συνθήκες που επικρατούσαν τότε, τα πυρηνικά απόβλητα που παρήχθησαν κυρίως στις μεγάλες στρατιωτικές εγκαταστάσεις παραγωγής των ΗΠΑ μεταφέρθηκαν στο περιβάλλον με σχεδόν μηδενικό κόστος στον ποταμό Κολούμπια, με ταφή στερεών και υγρών αποβλήτων

χαμηλού, μεσαίου και αραιωμένου υψηλού επιπέδου στις εγκαταστάσεις στρατιωτικών εργαστηρίων, με απόρριψη στερεών αποβλήτων στη θάλασσα, όπως στην περίπτωση του νησιού Farallon δυτικά του Σαν Φρανσίσκο, ή με απόρριψη υγρών αποβλήτων από το εργοστάσιο επανεπεξεργασίας Sellafield στη Θάλασσα της Ιρλανδίας (Jones, 2001).

Από τη δεκαετία του 1950 και μετά, έγιναν διορθώσεις σε αυτήν την πρακτική και καθορίστηκαν οι πρώτες ιδέες σχετικού προγράμματος για τη διάθεση πυρηνικών αποβλήτων. Οι κίνδυνοι εξάπλωσης των πυρηνικών αποβλήτων στο νερό αντιμετωπίστηκαν πιο ενεργά. Η συγκράτηση ραδιενεργών ουσιών θεωρήθηκε υποχρεωτική έως τα τέλη του αιώνα ενόψει της αναμενόμενης ισχυρής παγκόσμιας ανάπτυξης της βιομηχανίας: τη μακροπρόθεσμη απάντηση στο πρόβλημα της αποθήκευσης αποβλήτων. Εντατικοποιήθηκε η αναζήτηση τεχνικών περιορισμού και επιλογών διάθεσης. Υποβλήθηκαν αρχικές προτάσεις για την εισαγωγή ή τήξη πυρηνικών αποβλήτων σε τσιμέντα, γυαλί ή κεραμικές μήτρες, και την τελική τους απόρριψη σε γεωλογικό υπέδαφος, σε ερημικές περιοχές, ή σε αχρησιμοποίητα ορυχεία ή βαθιά πηγάδια (*World Nuclear Waste Report*, 2021).

Το 1953, ο Πρόεδρος των ΗΠΑ Dwight Eisenhower έδωσε ομιλία με τίτλο «Άτομα για την Ειρήνη<sup>4</sup>» ενώπιον της Γενικής Συνέλευσης των Ηνωμένων Εθνών με όραμα τη δημιουργία ενός διεθνούς οργανισμού για τον έλεγχο και την ανάπτυξη της χρήσης της ατομικής ενέργειας. Ο ΙΑΕΑ στη συνέχεια δημιουργήθηκε το 1957, από μια ομάδα δώδεκα εθνών με τους ακόλουθους σκοπούς/στόχους:

- να προωθήσει τις ειρηνικές χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας και
- να διασφαλίσει ότι η πυρηνική ενέργεια δεν θα χρησιμοποιηθεί για την προώθηση στρατιωτικών σκοπών.

Το 1957, η Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ ζήτησε από την Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ (National Academy of Science - NAS) να προτείνει μεθόδους για την ασφαλή διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Η NAS κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η βαθιά υπόγεια γεωλογική διάθεση των αποβλήτων ήταν η προτιμώμενη μέθοδος για την απόρριψη μακροχρόνιων

---

<sup>4</sup> Atoms for Peace

ραδιενεργών αποβλήτων – ένα συμπέρασμα που υποστηρίζεται από μεταγενέστερες μελέτες της NAS και έγινε αποδεκτή από όλα τα συμβούλια παγκοσμίως. Ανεξάρτητα από την επιλογή του κύκλου καυσίμου, θα παράγονται μακροχρόνια ραδιενεργά απόβλητα και απαιτούνται κατάλληλα αποθετήρια για τη απόρριψή τους (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

*Εικόνα 9. Η αρχική σελίδα της συμφωνίας της Αλάσκας (The Antarctic Treaty | NSF - National Science Foundation, 2021)*

Το καταστατικό του ΙΑΕΑ που ολοκληρώθηκε σε μια διάσκεψη του 1957 περιέχει τρεις πυλώνες της πυρηνικής επαλήθευσης και ασφάλειας, ασφάλειας και μεταφοράς και τεχνολογίας (Fischer, 1997). Το 1986, ως απάντηση στην καταστροφή του Τσερνομπίλ, ο ΙΑΕΑ επέκτεινε τις προσπάθειες πυρηνικής ασφάλειας. Λίγο μετά το ατύχημα, ο ΙΑΕΑ παρείχε άμεση υποστήριξη στη Σοβιετική Ένωση στον τομέα της περιβαλλοντικής αποκατάστασης, παροπλισμού και διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, για την ενίσχυση των επιπέδων ασφάλειας στο εργοστάσιο. Ο ΙΑΕΑ

συνεργάστηκε στενά με άλλους οργανισμούς των Ηνωμένων Εθνών στο πλαίσιο του «International Chernobyl Project», το οποίο παρείχε μια αξιολόγηση των ραδιολογικών συνεπειών του ατυχήματος και αξιολόγησε τα μέτρα προστασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο διεθνές συνέδριο με τίτλο «Μια δεκαετία μετά το Τσερνομπίλ: Περίληψη των συνεπειών του ατυχήματος» που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 1996 (International Atomic Energy Agency - IAEA), 2006).

Λίγο μετά το ατύχημα στο Chernobyl, ο IAEA συνέταξε δύο συμβάσεις που επικυρώθηκαν από τα κράτη μέλη - τη Σύμβαση για την έγκαιρη κοινοποίηση ενός πυρηνικού ατυχήματος και τη σύμβαση για την παροχή βοήθειας σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος ή έκτακτης ανάγκης από ακτινοβολίες, οι οποίες συμβάσεις θέσπισαν το διεθνές πλαίσιο έκτακτης ανάγκης, την ανταλλαγή πληροφοριών και την παροχή βοήθειας κατόπιν αιτήματος. Οι συμβάσεις εξουσιοδοτούν τον IAEA να ενεργεί ως διεθνής διαχειριστής που συντονίζει αυτές τις δραστηριότητες (International Atomic Energy Agency - IAEA), 2006).

Τα ραδιενεργά απόβλητα, όπως έχει αναφερθεί, εξακολουθούν να είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα της πυρηνικής ενέργειας. Μέλη της βιομηχανίας, καθώς και κυβερνήσεις και επιστήμονες, εξακολουθούν να προσπαθούν να βρουν έναν τρόπο διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων με ασφάλεια. Κατά το έτος 2021, αρκετές δεκαετίες μετά την έναρξη λειτουργίας του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα, δεν υπάρχει ακόμη ένα μόνιμο αποθετήριο ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου.

Αυτό όμως δεν ήταν κυρίως ζήτημα κατά τα πρώτα χρόνια της βιομηχανίας πυρηνικής ενέργειας. Καθώς οι χώρες επικεντρώθηκαν περισσότερο στην ανάπτυξη των προγραμμάτων πυρηνικών όπλων, το ζήτημα των πυρηνικών αποβλήτων επιλύθηκε εύκολα. Πιστεύεται ότι τόνοι ραδιενεργών αποβλήτων έχουν απορριφθεί στη θάλασσα από χώρες όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, τις ΗΠΑ ή την πρώην Σοβιετική Ένωση. Αυτή η μέθοδος διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων έπρεπε σύντομα να επανεξεταστεί όταν άρχισαν να δημιουργούνται ανησυχίες για τη ρύπανση των θαλασσών και των ωκεανών κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970. Ένα παράδειγμα ήταν η εμφάνιση του 1972 της Σύμβασης για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από την απόρριψη απορριμμάτων και άλλου υλικού, που είναι



γνωστή ως Σύμβαση Ντάμπινγκ του Λονδίνου (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*, 1973). Θεωρείται μία από τις πρώτες συμβάσεις με παγκόσμια προβολή σχετικά με την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από ανθρώπινες δραστηριότητες. Το άρθρο IV της ορίζει ότι «σύμφωνα με τις διατάξεις της παρούσας σύμβασης τα συμβαλλόμενα μέρη απαγορεύουν την απόρριψη οποιωνδήποτε αποβλήτων ή άλλου είδους υπό οποιαδήποτε μορφή ή κατάσταση, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά», και στη συνέχεια προσδιορίζει τα «ραδιενεργά απόβλητα ή άλλα ραδιενεργά υλικά» (International Atomic Energy Agency - IAEA), 2006).

Από το 1974, ο IAEA παρέχει μια σειρά προτύπων ασφαλείας καθώς και διεθνή συνεργασία για να διασφαλίσει ότι θα επιτευχθούν υψηλές επιδόσεις ασφάλειας σε όλες τις πυρηνικές εγκαταστάσεις των κρατών μελών. Τα πρότυπα ασφαλείας του IAEA καλύπτουν ποικίλους τομείς πυρηνικής ασφάλειας, ακτινοπροστασίας, διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, μεταφοράς ραδιενεργών υλικών, ασφάλειας εγκαταστάσεων κύκλου πυρηνικών καυσίμων και διασφάλισης ποιότητας (International Atomic Energy Agency - IAEA), 2006).

Έκτοτε, έχουν πραγματοποιηθεί επενδύσεις σε έρευνα που αποσκοπεί στην εξεύρεση νέων τρόπων αποτελεσματικής διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, δεν έχει βρεθεί ικανοποιητική μέθοδος διάθεσης αποβλήτων υψηλού επιπέδου.

Πριν από την αποθήκευσή τους, τα απόβλητα προετοιμάζονται με τη μορφή συσκευασιών σχεδιασμένων να περιορίζουν τη ραδιενέργεια και να διευκολύνουν το χειρισμό τους. Αυτά τα πακέτα είναι, για παράδειγμα, γυάλινα κουτιά 400 kg για τα απόβλητα υψηλής δραστηριότητας από την επανεπεξεργασία αναλωμένου καυσίμου ή από τις δέσμες αναλωμένου καυσίμου, που συλλέγονται από ομάδες σε θήκες. Αυτά τα πακέτα είναι τα αντικείμενα που πρόκειται να αποθηκευτούν. Στην περίπτωση αποβλήτων ενδιάμεσου επιπέδου, η μορφή με την οποία μπορούν να ρυθμιστούν τα απόβλητα είναι διαφορετική, αλλά το εξωτερικό περίβλημα της συσκευασίας είναι γενικά κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και καταβάλλεται προσπάθεια για την τυποποίηση των συσκευασιών προκειμένου να διευκολυνθούν τα απόβλητα (Εικόνα 10).



## Μεθοδολογίες αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων υψηλού κινδύνου

### α) Βαθιά γεωλογικά αποθετήρια (Deep Geological Reservoirs - DGR)

Ενώ τα απόβλητα χαμηλού επιπέδου μπορούν να απορριφθούν σε αποθήκες κοντά στην επιφάνεια παρόμοια με τους χώρους υγειονομικής ταφής, αυτό δεν συμβαίνει με τα απόβλητα υψηλού επιπέδου. Η γεωλογική απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων συνίσταται στην τοποθέτηση αποβλήτων υψηλού επιπέδου και αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου σε ασφαλή αποθετήρια αρκετών εκατοντάδων μέτρων υπόγεια. Αυτό συμβαίνει μετά την ενδιάμεση αποθήκευση των απορριμμάτων σε δεξαμενές ψύξης που τοποθετούνται κοντά στους αντιδραστήρες, μια αποθήκευση που μπορεί να διαρκέσει έως και μερικές δεκαετίες. Λαμβανομένων υπόψη των τεκταινόμενων της περιόδου, - τα επίπεδα ραδιενέργειας αρχίζουν να αποσυντίθενται και μόνο λίγοι τοις εκατό της αρχικής ποσότητας παραμένει, αλλά τα απόβλητα χρειάζονται ακόμη μια ειδική μέθοδο διάθεσης, για την οποία τα DGRs είναι κατάλληλα (Hedin, 1997).

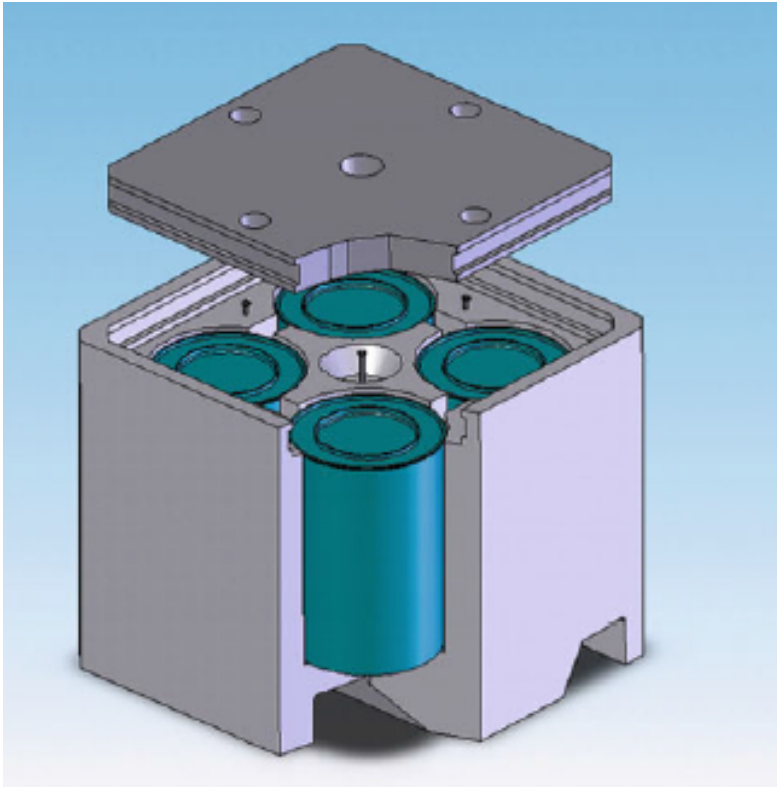
Χώρες που χρησιμοποιούν πυρηνική ενέργεια ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πραγματοποιήσει έρευνες σχετικά με λύσεις γεωλογικής διάθεσης και η γεωλογική διάθεση θεωρείται ευρέως αποδεκτή ως ασφαλής και περιβαλλοντικά ορθή λύση για τα είδη αποβλήτων που αναφέρονται παραπάνω. Η ασφάλεια αυτών των αποθετηρίων πηγάζει από το γεγονός ότι προστατεύονται από ένα πολλαπλό σύστημα φραγμών, μερικά από αυτά ως μέρος του μηχανικού σχεδιασμού του αποθετηρίου, αλλά και από τις γεωλογικές συνθήκες του περιβάλλοντος που επιλέγονται για τον εντοπισμό του αποθετηρίου: τη μορφή των αποβλήτων, το δοχείο απορριμμάτων, τα ρυθμιστικά υλικά, τη συμπλήρωση, τα συστήματα σφράγισης και τη γεωλογία (Morris et al., 2011). Επομένως, όταν ένα φράγμα δεν μπορεί να απομονωθεί λόγω οποιουδήποτε τεχνικού ζητήματος, δεν δημιουργείται αμέσως διαρροή στο περιβάλλον. Και ακόμη και όταν τα κατασκευασμένα εμπόδια υποβαθμίζονται μέσω αλληλεπίδρασης με γεωλογικά στοιχεία, όπως τα υπόγεια ύδατα, το οποίο είναι ένα λογικό σενάριο για μεγάλες χρονικές περιόδους, αυτό μπορεί να διαρκέσει χιλιάδες χρόνια και θα περάσει πολύς καιρός αφού η

ραδιενέργεια έχει φυσικά μειωθεί σε λιγότερο επιβλαβή επίπεδα. Δεδομένης αυτής της περίπτωσης, ακόμη και στο μέλλον, η ραδιενέργεια που απελευθερώνεται δεν θα προκαλέσει κινδύνους για την υγεία για τις μελλοντικές ανθρώπινες γενιές.

Σε διεθνές επίπεδο, αυτή είναι η πιο συχνή μέθοδος διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων και οι χώρες αποφάσισαν να αντιμετωπίσουν το ζήτημα των αποβλήτων της πυρηνικής ενέργειας με αυτήν τη στρατηγική μακροπρόθεσμα. Παρ'όλα αυτά, παρά τη διεθνή επιστημονική συναίνεση για το ότι είναι η καλύτερη λύση, δεν λειτουργεί σήμερα ούτε ένας βαθύς γεωλογικός χώρος αποθήκευσης αποβλήτων υψηλού επιπέδου. Η μηχανική δεν είναι όμως η κύρια πρόκληση για την εφαρμογή τους, αλλά οι εντάσεις που προκύπτουν σε μια τοπική κοινότητα για να επιτρέψει την κατασκευή ενός κοντινού αποθετηρίου. Ωστόσο, το κίνημα «Not In My Back Yard – NIMBY» (όχι στην αυλή μου) υπήρξε ισχυρό σε όλο τον κόσμο και εμπόδισε την κατασκευή DGR σε διάφορες περιπτώσεις (Bergmans et al., 2008).

Η Φινλανδία είναι η μόνη χώρα που έχει χτίσει ένα αποθετήριο, το Onkalo στο Olkiluoto, και αναμένεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του την επόμενη δεκαετία (Mattila & Tammisto, 2012), και η δεύτερη πιο προηγμένη χώρα από την άποψη του DGR είναι η Σουηδία, η οποία ευρίσκεται στη διαδικασία υποβολής αίτησης άδειας για την κατασκευή χώρου αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων (Baldwin et al., 2008).

*Εικόνα 10. Παράδειγμα κιβωτίου για μακροχρόνια απόβλητα μεσαίου επιπέδου. Αυτό το δοχείο μπορεί να φιλοξενήσει όλους τους τύπους των αποβλήτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ενδιάμεση αποθήκευση καθώς και για διάθεση (Casuci, 2010)*



### **β) Απόρριψη βαθιάς γεωλογικής διάθεσης (Deep borehole disposal-DBD)**

Παρά τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι εγκαταστάσεις βαθιάς γεωλογικής διάθεσης κατά την εφαρμογή τους, υπάρχουν υποστηρικτές για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων σε βαθιές γεωλογικές διαθέσεις. Η DBD υποστηρίζει μία διαδικασία μέσω γεωτρήσεων στο έδαφος, μήκους αρκετών χιλιομέτρων, στα οποία τοποθετούνται τα ραδιενεργά απόβλητα και καλύπτονται με πετρώματα και τσιμέντο (Arnold et al., 2014).

Αυτή η μέθοδος απόρριψης παρουσιάζει πολλά οφέλη. Η έννοια της βαθιάς γεωλογικής απόθεσης προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με την έννοια των γεωλογικών αποθετηρίων από την άποψη της τοποθεσίας, καθώς δεν είναι σημαντικό να επιλεγεί η περιοχή διάνοιξης των γεωτρήσεων, αλλά και ως μια πιο ασφαλή, οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά ορθή μέθοδος σε σύγκριση με τα κοιτάσματα που εξορύσσονται.

Ενώ εξακολουθούν να υφίστανται ορισμένες προκλήσεις μηχανικής, ειδικά όσον αφορά τους περιορισμούς στο πλάτος αυτών των γεωτρήσεων, διότι μέχρι στιγμής δεν έχει επιτευχθεί διάνοιξη με διαμέτρους τέτοιου εύρους όσο τα μεγάλα δοχεία ραδιενεργών αποβλήτων που προορίζονται για απόρριψη στη DGR, η απόρριψη βαθιάς γεωλογικής διάθεσης θα μπορούσε να χρησιμοποιείται για τη διάθεση ορισμένων τύπων ραδιενεργών αποβλήτων, αποτελώντας μια εύκολη και οικονομική μέθοδος εκτέλεσης (Beswick et al., 2014).

### **γ) Αποθήκευση πάνω από το έδαφος**

Μια εναλλακτική λύση για την υπόγεια διάθεση είναι η απόρριψη σε επίπεδα πάνω από το έδαφος. Ωστόσο, είναι πιο ακριβές να αναφέρεται αυτή η μέθοδος ως διαδικασία αποθήκευσης. Επομένως, πρέπει να αναφερθεί η διαφορά μεταξύ των εννοιών της διάθεσης έναντι της αποθήκευσης. Ενώ η πρώτη αφορά συνήθως την δια παντός απαλλαγή των αποβλήτων, η δεύτερη αναφέρεται στη διατήρηση των αποβλήτων με τρόπο που επιτρέπει την ανάκτηση στο μέλλον, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι εν τω μεταξύ είναι απομονωμένα από το εξωτερικό περιβάλλον (World Nuclear Association, 2018). Για αυτόν τον λόγο, όταν γίνεται αναφορά για απόρριψη πάνω από το έδαφος, είναι πιο σωστό να αναφέρεται ως αποθήκευση, καθώς τα απόβλητα μπορούν να ανακτηθούν κατά βούληση.

Μία τεχνική για την αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων είναι σε ειδικές αποθήκες. Σε αυτές, το αναλωμένο καύσιμο που έχει ήδη ψυχθεί σε δεξαμενές αναλωμένου καυσίμου για τουλάχιστον ένα χρόνο και έως και μια δεκαετία, το οποίο επιτρέπει επίσης τα επίπεδα ραδιενέργειας να αποσυντεθούν, αφαιρείται από αυτές τις

δεξαμενές και τοποθετείται σε βαρέλια, πρακτική η οποία μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής και για ο περιβάλλον και για τον άνθρωπο. Είναι ειδικά σχεδιασμένα για να περιέχουν την ακτινοβολία και να ελέγχουν τη θερμότητα, καθώς και να αντιστέκονται σε ακραίες συνθήκες, όπως σεισμούς ή ακραίες θερμοκρασίες, για να αποτρέπεται η απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον (USNRC, 2013).

Συνήθως μοιάζουν με θόλους από σκυρόδεμα από έξω, επειδή το σκυρόδεμα παρέχει την ασπίδα ακτινοβολίας, αλλά το αναλωμένο καύσιμο τοποθετείται μέσα σε πολλά στρώματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί μακροπρόθεσμη λύση για την απόρριψη πυρηνικών αποβλήτων, αλλά επιτρέπει την ανάκτηση αυτού του χρησιμοποιημένου καυσίμου για την επανεπεξεργασία του, εάν χρειάζεται. Ωστόσο, η αποθήκευση αυτού του είδους προορίζεται για την αποθήκευση αποβλήτων υψηλού επιπέδου σε επίπεδα πάνω από το έδαφος, αλλά υπάρχουν και άλλα μέσα διάθεσης για ραδιενεργά απόβλητα υπόγεια, αλλά σε βάθος κοντά στην επιφάνεια. Ωστόσο, αυτές είναι μόνο κατάλληλες μέθοδοι διάθεσης για πολύ χαμηλά και χαμηλού επιπέδου ραδιενεργά απόβλητα.

Η αποθήκευση αναλωμένου καυσίμου ή υαλοποιημένων αποβλήτων είναι ήδη μια ώριμη βιομηχανική διαδικασία. Η εγκατάσταση αποθήκευσης είναι γενικά μια επιφανειακή εγκατάσταση που αποτελείται από ένα κτίριο ή ογκώδεις κατασκευές που εξασφαλίζουν την προστασία των πακέτων. Η σύλληψη της δυνατότητας αποθήκευσης καθιστά δυνατή την ανάκτηση του πακέτου και εγγυάται τον ασφαλή περιορισμό των ραδιενεργών υλικών. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι εγκαταστάσεων αποθήκευσης: πισίνες και εγκαταστάσεις ξηρής αποθήκευσης (Εικόνα 11 και 12). Και οι δύο τύποι απαιτούν κάποια παρακολούθηση και συντήρηση για την εκτέλεση της λειτουργίας τους σύμφωνα με τους στόχους που γενικά αποδίδονται σε αυτές τις εγκαταστάσεις από τις Αρχές Ασφάλειας.

Ενώ η υγρή αποθήκευση χρησιμοποιείται μόνο για αναλωμένο καύσιμο (το οποίο είναι απόβλητο μόνο εάν δεν προβλέπεται επανεπεξεργασία), η ξηρή αποθήκευση χρησιμοποιείται τόσο για αναλωμένο καύσιμο όσο και για γυαλί. Στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης πισίνας, το νερό της πισίνας ψύχει το αναλωμένο καύσιμο και προστατεύει τους χειριστές από την ακτινοβολία. Η παρουσία νερού πρέπει να είναι μόνιμη, η χημική του σύνθεση να παρακολουθείται και να προσαρμόζεται, εάν είναι

απαραίτητο, για να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης και επακόλουθες ραδιενεργές διαρροές από το καύσιμο.



*Εικόνα 11. Πισίνα για την προσωρινή αποθήκευση αναλωμένου καυσίμου στο εργοστάσιο επανεπεξεργασίας της La Hague (Γαλλία) Διαστάσεις: L: 50 m; l: 16 m, P: 9 (περίπου 7200 m<sup>3</sup> νερό) Χωρητικότητα αποθήκευσης: 730 βουτιά, το καθένα φέρει 9 συγκροτήματα PWR ή 16 συγκροτήματα BWR (~ 4000 t, αντιδραστήρας ~ 200. έτη) (Cacuci, 2010)*

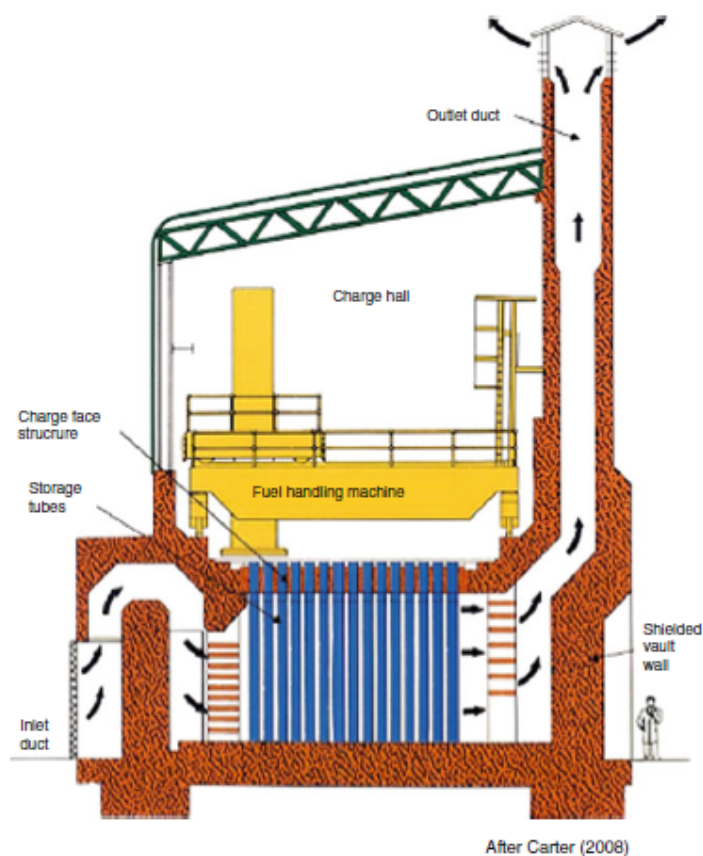


Οι εγκαταστάσεις διάθεσης πλησίον της επιφάνειας βρίσκονται σε λειτουργία σε πολλές χώρες, όπως:

- UK - LLW Repository στο Drigg στην Cumbria που διαχειρίζεται η UK Nuclear Waste Management (μια κοινοπραξία με επικεφαλής την Washington Group International με την Studsvik UK, Serco και Areva) εξ ονόματος της Αρχής Παροπλισμού Πυρηνικών.
- Ισπανία - Εγκαταστάσεις διάθεσης El Cabril LLW και ILW που διαχειρίζεται η ENRESA.
- Γαλλία - Center de l'Aube και Morvilliers που διαχειρίζεται η ANDRA.
- Σουηδία - SFR στο Forsmark που διαχειρίζεται η SKB.
- Φινλανδία - Olkiluoto και Loviisa, που διαχειρίζονται οι TVO και Fortum.

- Ρωσία - Ozersk, Tomsk, Novouralsk, Sosnovy Bor, που λειτουργεί από ΝΟ RAO.
- Νότια Κορέα - Wolsong, που διαχειρίζεται η KORAD.
- Ιαπωνία - Κέντρο διάθεσης LLW στο Rokkasho-Mura που διαχειρίζεται η Japan Nuclear Fuel Limited.
- ΗΠΑ - πέντε εγκαταστάσεις διάθεσης LLW: Texas Compact εγκατάσταση κοντά στα σύνορα του Νέου Μεξικού, που διαχειρίζονται οι Waste Control Specialists. Barnwell, Νότια Καρολίνα; Clive, Γιούτα; Oak Ridge, Tennessee - όλα λειτουργούν από την Energy Solutions. and Richland, Washington - λειτουργεί από την American Ecology Corporation.(World Nuclear Association, 2018)

Εικόνα 12. Τυπικός σχεδιασμός φυλακίου για την ενδιάμεση αποθήκευση αναλωμένου καυσίμου (Cacuci, 2010)



- Μεταλλευτικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου: αφορά στα διατηρητέα κτήρια της πρώην Γαλλικής Εταιρείας Μεταλλείων Λαυρίου (Companie Francaise des Minesdu Laurium) και στο χώρο γύρω από αυτά, συνολικής έκτασης 250 στρεμμάτων, με βασικό σκοπό τη διάσωση της βιομηχανικής και πολιτιστικής κληρονομιάς του Λαυρίου.

Συγκεκριμένα σε ότι αφορά τη διαδικασία περιβαλλοντικής εξυγίανσης για το πρόγραμμα «Εξυγίανση Εδαφών και Συμπληρωματικά Έργα στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου» πραγματοποιήθηκε διαμόρφωση του υπόγειου χώρου με σκοπό την τοποθέτηση ειδικών αποβλήτων τα οποία για τεχνικούς και περιβαλλοντικούς λόγους δεν θα αναμειχθούν με τα ρυπασμένα εδάφη που τοποθετούνται στον Χ.Υ.Τ.Ρ.Ε. Και σε αυτή την περίπτωση, τα απόβλητα αυτά προήλθαν από τη μεταλλευτική/ μεταλλουργική δραστηριότητα που αναπτύχθηκε στο παρελθόν στο χώρο του Πάρκου. Όπως αναφέρεται στην μελέτη του έργου «*Τα απόβλητα αυτά (κυρίως αρσενικούχες ενώσεις) θα τοποθετηθούν σε ειδικά δοχεία, που θα επιτρέψουν την ασφαλή διάθεσή τους για μεγάλο χρονικό διάστημα, στον ειδικά διαμορφωμένο υπόγειο χώρο. Τονίζεται για μια ακόμη φορά, ότι τα απόβλητα αυτά θα αφορούν μόνο σε εκείνα που είναι παρόντα στο χώρο του Τ.Π.Π.Λ. και επ' ουδενί ο υπόγειος χώρος δεν πρόκειται να δεχθεί απόβλητα ή εδάφη από πηγές εκτός του Τ.Π.Π.Λ.<sup>5</sup>.*»

---

<sup>5</sup> <https://www.ltcp.ntua.gr/renovation/>

Εικόνα 13. Η διαμόρφωση του υπόγειου χώρου



#### **δ) Πυρηνική επανεπεξεργασία**

Η πυρηνική επανεπεξεργασία πραγματοποιείται σε κλειστούς κύκλους καυσίμου, σε αντίθεση με τους ανοικτούς κύκλους καυσίμου. Από τη μία πλευρά, σε κύκλους ανοιχτού καυσίμου, το χρησιμοποιημένο πυρηνικό καύσιμο απορρίπτεται από τον αντιδραστήρα για να αντιμετωπιστεί ως απόβλητο. Προφανώς, πρόκειται για ραδιενεργά απόβλητα υψηλού επιπέδου που πρέπει να απορριφθούν παρόλα τα προβλήματα που τίθενται. Από την άλλη πλευρά, σε κλειστούς κύκλους καυσίμου, το αναλωμένο καύσιμο που αποβάλλεται από τον αντιδραστήρα επανεπεξεργάζεται. Αυτό συμβαίνει επειδή σε αυτό, υπάρχει πλουτόνιο και ουράνιο κατάλληλα για την κατασκευή μικτού καυσίμου οξειδίου (MOX), τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν πίσω στον αντιδραστήρα. Μερικά από τα επανεπεξεργασμένα καύσιμα θα εξακολουθούν να θεωρούνται υψηλής επικινδυνότητας, αλλά η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων θα μειωθεί σημαντικά. Για το λόγο αυτό, η πυρηνική επανεπεξεργασία είναι, ως ένα βαθμό, μια μέθοδος διάθεσης. Ωστόσο, τα εναπομένοντα απόβλητα πρέπει ακόμη να απορριφθούν σύμφωνα με την κατηγορία των HLW και, ως εκ τούτου, η πυρηνική επανεπεξεργασία δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μακροπρόθεσμη μέθοδος διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων.

Υπάρχουν άλλοι λόγοι για τους οποίους οι κύκλοι κλειστού καυσίμου και συνεπώς η ανακύκλωση αναλωμένου καυσίμου δεν λαμβάνεται υπόψη σε πολλές χώρες. Υπάρχουν λόγοι κόστους, δηλαδή η επανεπεξεργασία αναλωμένου καυσίμου πραγματοποιείται σε εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας, οι οποίες είναι επίσης σημαντικές επενδύσεις. Ωστόσο, οι ανοιχτοί κύκλοι καυσίμων προτιμούνται επίσης σε περιπτώσεις μη διάδοσης, καθώς δεν υπάρχει διαχωρισμός του πλουτωνίου από τα αναλωμένα καύσιμα και οι κίνδυνοι πολλαπλασιασμού είναι υπό έλεγχο (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

### ε) Άλλες μέθοδοι

Η έρευνα σχετικά με τη διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων έχει επίσης εξετάσει πολλές άλλες μεθόδους, αλλά οι περισσότερες έχουν απορριφθεί λόγω της μη πρακτικότητάς τους, του κόστους ή της μη αποδοχής τους από οικολογική άποψη. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθούν.

Η διάθεση πυρηνικών αποβλήτων στο διάστημα θεωρήθηκε ως πιθανή επιλογή στην αρχή και ακόμη και η Εθνική Διοίκηση Αεροναυτικής και Διαστήματος των ΗΠΑ (NASA) σχεδίασε ένα τεχνικό έγγραφο το 1978 που μελέτησε τη βιωσιμότητα της συγκεκριμένης πρακτικής, αναλύοντας πτυχές όπως οι επιλογές χώρου, η συσκευασία που απαιτείται ή οι απαιτήσεις ασφάλειας και διαστημικού συστήματος μεταφοράς (Lunan, 1983). Ωστόσο, παρόλο που η απόρριψη θα μπορούσε να είναι εφικτή από τεχνική άποψη, σύμφωνα με τη NASA, οι περιορισμοί της δεν την έκαναν ελκυστική επιλογή.

Η απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων σε φύλλα πάγου έχει επίσης εξεταστεί, ήδη από τη δεκαετία του 1950. Επιστήμονες έχουν προτείνει τρόπους απόρριψης ραδιενεργών αποβλήτων κάτω από την επιφάνεια της Γης, είτε στον πάγο της Ανταρκτικής είτε στη Γροιλανδία, επιβεβαιώνοντας ότι ακόμη και «Οι πιο αναστατωμένες φυσικές αστάθειες των φύλλων πάγου και / ή οι κλιματολογικές αλλαγές δεν θα μπορούσαν να προκαλέσουν ραδιενεργή μόλυνση» (Philberth, 1977). Ωστόσο, είναι μια αμφισβητήσιμη επιλογή από οικολογικής άποψης, αλλά και νομικής, καθώς η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων στην Ανταρκτική απαγορεύεται ρητά από το άρθρο V της Συνθήκης της Ανταρκτικής, το οποίο ορίζει ότι «οποιοσδήποτε πυρηνικές εκρήξεις στην Ανταρκτική και η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων απαγορεύονται» (1959-Antarctic-Treaty).

Μια άλλη μέθοδος που έχει προταθεί είναι η απόρριψη πυρηνικών αποβλήτων σε απομονωμένα νησιά. Αφορά σε μία μέθοδο που έχει εφαρμοστεί στο παρελθόν, για παράδειγμα, από τις ΗΠΑ, στα Νησιά Μάρσαλ (Davisson et al., 2012). Οι ΗΠΑ πραγματοποίησαν αρκετές πυρηνικές δοκιμές στο Νησί Ρόνιτ μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και έχτισαν ένα συγκεκριμένο θόλο για να ενθυλακώσουν τα

παραγόμενα ραδιενεργά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων ποσοτήτων πλουτωνίου. Δεν είναι, ωστόσο, ικανοποιητικό μέσο απόρριψης, καθώς οι γηγενείς παρατήρησαν πώς οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σχετικά με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας επηρέαζαν το θόλο με αποτέλεσμα την απορροή των ραδιενεργών νερών με αποτέλεσμα τη μόλυνση των κοντινών κοραλλιογενών υφάλων.

Έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι, όπως η διάθεση αποβλήτων σε τάφρους που βρίσκονται στους ωκεανούς. Η ιδέα θα ήταν ότι, λόγω της διαδικασίας υποβύθισης των τεκτονικών πλακών, τα βαρέλια ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου θα μπορούσαν να μετακινούνται προς τον καυτό μανδύα από τις πλάκες. Ωστόσο, είναι μια επιλογή που έχει απορριφθεί. Προέρχεται από το γεγονός ότι αυτή η διαδικασία είναι εξαιρετικά βραδεία και, επομένως, αυτά τα βαρέλια θα εξακολουθούν να είναι διαθέσιμα για χιλιάδες χρόνια. Ακόμα κι έτσι, η διάθεση θα πραγματοποιούταν στους ωκεανούς, η οποία απαγορεύεται από τη Σύμβαση Ντάμπινγκ του Λονδίνου (IMO, 2021).

---

## *Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>*

### *Περιβαλλοντικά και κοινωνικο-οικονομικά προβλήματα των πυρηνικών αποβλήτων*

---

Σε ότι αφορά το διεθνές νομικό πλαίσιο διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, κατά τα πρώτα χρόνια της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, τα μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας δεν είχαν προκαλέσει ιδιαίτερη ανησυχία παγκοσμίως. Για το λόγο αυτό, οι κίνδυνοι δεν ελήφθησαν υπόψη κατά τη χάραξη των εσωτερικών πολιτικών σχετικά με τα πυρηνικά απόβλητα. Σύμφωνα με τον ΙΑΕΑ, πιστεύεται ότι οι κίνδυνοι υπό το πρίσμα της ανθρώπινης ζωής και του περιβάλλοντος θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με ασφάλεια μέσω διακυβερνητικής συνεργασίας σε θέματα ασφάλειας. Οι πρώτες ανησυχίες για την πυρηνική ενέργεια δεν αφορούσαν περιστατικά ή απόβλητα, αλλά για κινδύνους διάδοσης, ειδικά πέραν των πέντε Μόνιμων Μελών του Συμβουλίου Ασφαλείας του ΟΗΕ. Σε αυτόν τον τομέα, στο πλαίσιο του ΙΑΕΑ, η Συνθήκη για τη μη διάδοση των πυρηνικών όπλων εγκρίθηκε το 1968, για να αποφευχθεί η εξάπλωση των πυρηνικών όπλων, αν και δεν μείωσε τα υπάρχοντα οπλοστάσια πυρηνικών όπλων (Birnie et al., 2009; Shaver, 1995) και οι δοκιμές πυρηνικών όπλων συνέχισαν να διεξάγονται από τις δυνάμεις πυρηνικών όπλων, ενάντια στις δεσμεύσεις που ανέλαβε το 1963 η Συνθήκη περί μερικής απαγόρευσης δοκιμών (“Union of Soviet Socialist Republics, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, the United States of America, France–Austria,” 1955), η οποία απαγόρευσε τη δοκιμή πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα, στο διάστημα και στο νερό.

Αναφέρεται ως εκ τούτου, ότι οι σχετικές ρυθμίσεις ασφαλείας υπόκεινται σε εθνικό πλαίσιο ευθύνης. Ωστόσο, οι κίνδυνοι ακτινοβολίας ενδέχεται να διαπεράσουν το εθνικό πλαίσιο αναφοράς και μία συνεργασία σε διεθνές επίπεδο μπορεί να χαρακτηριστεί ιδιαίτερος χρήσιμη σε ότι αφορά την προώθηση και την ενίσχυση της



ασφάλειας παγκοσμίως μέσω της ανταλλαγής εμπειριών και της βελτίωσης των δυνατοτήτων ελέγχου των κινδύνων, πρόληψης ατυχημάτων, ανταπόκρισης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και μετριασμού τυχόν επιβλαβών συνεπειών. Τα κράτη έχουν υποχρέωση επιμέλειας και καθήκον φροντίδας και αναμένεται να εκπληρώνουν τις εθνικές και διεθνείς υποχρεώσεις τους. Τα διεθνή πρότυπα ασφάλειας θα πρέπει να παρέχουν υποστήριξη στα κράτη να εκπληρώνουν τις υποχρεώσεις τους σύμφωνα με τις γενικές αρχές του διεθνούς δικαίου, όπως αυτές που σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος. Τα διεθνή πρότυπα ασφάλειας θα πρέπει επίσης να προωθούν και να διασφαλίζουν την εμπιστοσύνη στην ασφάλεια και να διευκολύνουν το διεθνές εμπόριο και μεταφορές (IAEA, 2009).

Το 1996, η συνολική συνθήκη απαγόρευσης των πυρηνικών δοκιμών (Graham, 1998) εγκρίθηκε για την πλήρη απαγόρευση των πυρηνικών δοκιμών, αν και δεν έχει τεθεί σε ισχύ ακόμη λόγω συγκεκριμένων εθνών, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες ή η Κίνα, που δεν την επικυρώνουν (Birnie et al., 2009; Shaver, 1995). Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες δεν ήταν προτεραιότητα έως ότου η αυξανόμενη δημοτικότητα των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας ως μέρος της αντίδρασης στην πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 έφερε στο φως τα προβλήματα των εκπομπών ραδιενέργειας και της διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Σε αυτόν τον τομέα, ένα από τα πρώτα νομικά μέσα ήταν η προαναφερθείσα Σύμβαση Ντάμπινγκ του Λονδίνου, η οποία απαγόρευσε τη διάθεση πυρηνικών αποβλήτων στον ωκεανό (Birnie et al., 2009; Shaver, 1995).

Ειδικά μετά το Τσερνομπίλ, δίδεται προτεραιότητα στον διεθνή έλεγχο των ζητημάτων ασφάλειας, καθώς ο κόσμος άρχισε να διαχωρίζεται μεταξύ των επικριτών της πυρηνικής ενέργειας και των σταθερών πιστών της διεθνούς συνεργασίας για τον περιορισμό των κινδύνων της πυρηνικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο του IAEA, έχουν εγκριθεί πολλές διεθνείς συμβάσεις στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας. Ειδικά, έχουν αντιμετωπίσει τα θέματα ασφάλειας (de Kagenek & Pinel, 1998), έκτακτης ανάγκης (Bergesen et al., 2019b) και επισφάλειας (Bergesen et al., 2019a). Στην κατηγορία ασφαλείας τίθεται η αναφορά στα ραδιενεργά απόβλητα. Τα κράτη μέλη του IAEA υιοθέτησαν την κοινή σύμβαση που αφορούσε την ασφάλεια και τη διαχείριση των αναλωμένων καυσίμων και των

ραδιενεργών αποβλήτων (κοινή σύμβαση) το 1997 (de Kageneck & Pinel, 1998). Θεωρείται το πρώτο διεθνές νομικό μέσο για την αντιμετώπιση του ζητήματος της διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων. Οι κύριοι στόχοι της Σύμβασης είναι:

- (i) η επίτευξη και διατήρηση υψηλού επιπέδου ασφάλειας παγκοσμίως στη διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με πρακτικές ενίσχυσης των εθνικών μέτρων και προαγωγής της διεθνούς συνεργασίας [...]
  - (ii) η διασφάλιση ότι σε όλα τα στάδια διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων υπάρχουν αποτελεσματικές διαχειριστικές πολιτικές ενάντια σε πιθανούς κινδύνους [...] έτσι ώστε οι ανάγκες και οι φιλοδοξίες της σημερινής γενιάς να ικανοποιούνται χωρίς να διακυβεύεται η δυνατότητα στις μελλοντικές γενεές να είναι σε θέση να ικανοποιούν τις ενδεχόμενες ανάγκες τους και τις προκύπτουσες φιλοδοξίες τους [και]
  - (iii) η πρόληψη ατυχημάτων και ο περιορισμός των συνεπειών τους [...]
- »(άρθρο 1).

Σύμφωνα με το άρθρο 3, το πεδίο εφαρμογής της Σύμβασης είναι η διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων από μη στρατιωτικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες και από μη στρατιωτικές εφαρμογές. Επομένως, τα απόβλητα που παράγονται στο πλαίσιο στρατιωτικών προγραμμάτων αποκλείονται, εκτός εάν γίνει αποδεκτή η επέκταση του πεδίου εφαρμογής από το συμβαλλόμενο μέρος ή τα απόβλητα μεταφέρονται σε μόνιμο πολιτικό έλεγχο. Επιπλέον, η επανεπεξεργασία αναλωμένου καυσίμου συμπεριλαμβάνεται μόνο αν το δηλώσει το σχετικό μέρος (Birnie et al., 2009).

Η σημασία της κοινής σύμβασης όσον αφορά την επίτευξη αυτών των στόχων βασίζεται, αφενός, στην καθιέρωση θεμελιωδών αρχών ασφάλειας στους διάφορους τομείς της διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων. Από την άλλη πλευρά, δημιουργεί επίσης διαδικασία αξιολόγησης, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 6 των συνεδριάσεων των συμβαλλομένων μερών, για την οποία αυτά τα μέρη δεσμεύονται να «υποβάλουν εθνική έκθεση σε κάθε συνεδρίαση αναθεώρησης των συμβαλλομένων μερών» (άρθρο 32- 1), στην οποία έκθεση

μπορούν να παρουσιαστούν εκτενώς τα μέτρα που θα πρέπει να ληφθούν για την εφαρμογή των υποχρεώσεων που απαριθμούνται στη Σύμβαση, καθώς και οι απαιτήσεις υποβολής εκθέσεων που αναφέρονται στο άρθρο 32. Οι συναντήσεις αυτές πραγματοποιούνται με διαστήματα όχι πλέον των τριών ετών, όπως αναφέρεται στο άρθρο 30 -2 (i) (Birnie et al., 2009).

Οι κύριες διατάξεις της σύμβασης όσον αφορά τις γενικές υποχρεώσεις ασφάλειας βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στις αρχές του ραδιενεργού αποβλήτου του ΙΑΕΑ του 1995. Για το λόγο αυτό, η Κοινή Σύμβαση θεωρείται ότι έδωσε σε αυτά τα πρότυπα ασφάλειας του ΙΑΕΑ δεσμευτικό καθεστώς συνθήκης. Ως εκ τούτου, η Σύμβαση δεν δημιουργεί νέο νόμο αλλά μάλλον ενισχύει το καθεστώς των αρχών που έχουν ήδη αναγνωριστεί. Το ίδιο συνέβη με τις κύριες διατάξεις του κώδικα πρακτικής του ΙΑΕΑ του 1990 σχετικά με τη διεθνή διασυνοριακή κυκλοφορία ραδιενεργών αποβλήτων. Αυτές οι απαγορευτικές συστάσεις βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό στη Σύμβαση της Βασιλείας για τον έλεγχο των διασυνοριακών μετακινήσεων επικίνδυνων αποβλήτων και στη διάθεσή τους του 1989, από την οποία τα ραδιενεργά απόβλητα αποκλείστηκαν ρητά από το άρθρο 1-3(The Basel Convention, 2011).

Η Σύμβαση έδωσε δεσμευτική ισχύ σε αυτόν τον Κώδικα Πρακτικής μέσω της συμπερίληψης του Άρθρου 27 της Κοινής Σύμβασης, το οποίο ρυθμίζει τη διασυνοριακή κυκλοφορία ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ο στόχος που αναφέρεται στο άρθρο 1 σημείο ii) θεωρείται η ισχυρότερη διάταξη για την ισότητα μεταξύ των γενεών που ορίζεται σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική συνθήκη και, κατά συνέπεια, η παρούσα σύμβαση είναι σημαντική, όχι μόνο όσον αφορά το δίκαιο της πυρηνικής ενέργειας και αποβλήτων, αλλά και του νόμου για το περιβάλλον (Birnie et al., 2009).

Όπως φαίνεται ανωτέρω, η Κοινή Σύμβαση είναι ένα μέσο με νομική δεσμευτική δύναμη που επηρεάζει τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, ο ΙΑΕΑ έχει το δικαίωμα να θεσπίσει και να υιοθετήσει «πρότυπα ασφάλειας που σκοπό έχουν την προστασία της υγείας μέσω πρακτικών που σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση του ενδεχόμενου κινδύνου, που μπορεί να σχετίζεται επακόλουθα με τη ζωή και την περιουσία (συμπεριλαμβανομένων αυτών των προτύπων για τις συνθήκες εργασίας)» (Καταστατικό ΙΑΕΑ, άρθρο III.A.6) σε συνεργασία με άλλους

Οργανισμοί του ΟΗΕ. Αυτά τα πρότυπα περιλαμβάνουν κανονισμούς, κανόνες, απαιτήσεις, κώδικες πρακτικής και οδηγούς, που καλύπτουν θέματα όπως η ακτινοπροστασία, η μεταφορά και ο χειρισμός ραδιενεργών υλικών, η ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων, αλλά και η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων (Birnie et al., 2009).

Το καταστατικό του ΙΑΕΑ δεν παρέχει δεσμευτική ισχύ σε αυτά τα πρότυπα υγείας και ασφάλειας. Στην πραγματικότητα, τα κράτη μέλη δεν υποχρεούνται να συμμορφώνονται με αυτά. Ωστόσο, έχουν συμβάλει στον έλεγχο των κινδύνων πυρηνικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτά τα έγγραφα, παρόλο που η έγκρισή τους μπορεί να είναι αμφιλεγόμενη –όπως ενίοτε εγκρίνονται από το Συμβούλιο των Διοικητών του ΙΑΕΑ, και όχι από τη Γενική Διάσκεψη στην οποία εκπροσωπούνται όλα τα κράτη μέλη–, καταρτίζονται σε συνεργασία με εξειδικευμένους φορείς και αντικατοπτρίζουν ένα μεγάλο μέτρο της εμπειρογνομosύνης και της τεχνικής συναίνεσης, μετά από διαβούλευση με τις κυβερνήσεις κατά το στάδιο της διατύπωσης. Επομένως, αυτά τα πρότυπα έχουν οδηγήσει σε μεγάλο βαθμό εναρμόνιση μεταξύ της διεθνούς κοινότητας (Birnie et al., 2009).

Ορισμένα από τα πρότυπα ασφάλειας του ΙΑΕΑ που σχετίζονται με το θέμα των ραδιενεργών αποβλήτων είναι ο Οδηγός ασφάλειας αρ. WS-G-6.1 για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων (2006), ο ειδικός οδηγός ασφαλείας αριθ. SSG-15 για την αποθήκευση των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων (2012), ο Γενικός Οδηγός Ασφάλειας GSG-1 για την Ταξινόμηση των Ραδιενεργών Αποβλήτων (2009), ο Ειδικός Οδηγός Ασφάλειας Αρ. SSG-47 σχετικά με τον παροπλισμό πυρηνικών σταθμών, αντιδραστήρες έρευνας και άλλες εγκαταστάσεις κύκλου πυρηνικών καυσίμων (2018), μεταξύ άλλων. Περιλαμβάνονται στο Πρόγραμμα Προτύπων Ασφάλειας Ραδιενεργών Αποβλήτων (RASWASS), με στόχο τη δημιουργία ενός «συνεκτικού και περιεκτικού συνόλου αρχών, απαιτήσεων και συστάσεων για την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και τη διαμόρφωση των απαραίτητων οδηγιών για την εφαρμογή τους» (Vonk, 1998).

Στο πλαίσιο του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), ο Οργανισμός Πυρηνικής Ενέργειας (Nuclear Energy Agency - NEA) έχει επίσης παρόμοιο ρόλο με τον ΙΑΕΑ και τα πρότυπα διαχείρισης αποβλήτων έχουν

υιοθετηθεί σε συνεργασία μεταξύ του ΙΑΕΑ, αλλά όπως και τα πρότυπα του ΙΑΕΑ, η ΝΕΑ δεν έχει καμία εξουσία να υποχρεώσει τη συμμόρφωση των κρατών μελών της (Birnie et al., 2009).

Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι επίσης ένα ζήτημα που εξετάζεται, όχι ακριβώς στο πλαίσιο του ΙΑΕΑ, αλλά κάτω από την ομπρέλα του ΟΗΕ. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της 74ης περιόδου συνόδων της UNGA, ενέκρινε μια σειρά ψηφισμάτων, μετά τις συστάσεις της πρώτης επιτροπής, στο σημείο «Γενικός και πλήρης αφοπλισμός». Ένα από αυτά τα ψηφίσματα είναι η απαγόρευση της απόρριψης ραδιενεργών αποβλήτων, ένα σχέδιο ψηφίσματος που υποβλήθηκε στην επιτροπή από τη Νιγηρία, εξ ονόματος των κρατών μελών του ΟΗΕ που είναι μέλη της ομάδας των αφρικανικών κρατών. Το γεγονός ότι υποβλήθηκε από τα αφρικανικά κράτη δεν είναι ασήμαντο. Ανταποκρίνεται στον φόβο ότι η Αφρική θα μπορούσε να γίνει χώρος υγειονομικής ταφής ραδιενεργών αποβλήτων στον κόσμο, αφού ορισμένες από τις χώρες της, όπως η Γκάνα ή η Νιγηρία, έχουν ήδη γίνει οι ανεπίσημοι χώροι υγειονομικής ταφής των ηλεκτρονικών αποβλήτων των πλουσιότερων ευρωπαϊκών χωρών (World Economic Forum, 2019). Θα ήταν φυσικό να πιστεύουμε ότι τα ραδιενεργά απόβλητα θα μπορούσαν να απορριφθούν στη συνέχεια.

Οι αφρικανικές χώρες προστατεύονται ήδη από τη Σύμβαση Bamako (1991), μια συνθήκη από αφρικανικά έθνη που απαγορεύει την εισαγωγή στην ήπειρο τυχόν επικίνδυνων αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των ραδιενεργών αποβλήτων. Όπως αναφέρεται στο άρθρο 2.2, «Απόβλητα τα οποία, λόγω ραδιενεργού υλικού, υπόκεινται σε διεθνή συστήματα ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων διεθνών μέσων, που ισχύουν ειδικά για ραδιενεργά υλικά, περιλαμβάνονται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας Σύμβασης» Ωστόσο, είναι ενδιαφέρον να ενισχύσουμε την ιδέα μέσω του UNGA. Το ψήφισμα που εγκρίθηκε από την UNGA, Απαγόρευση απόρριψης ραδιενεργών αποβλήτων (UN Assembly, 2014), απευθύνεται στη διεθνή κοινότητα με μερικές ενδιαφέρουσες δηλώσεις. Μεταξύ άλλων, έκαστο κράτος μέσω της συγκεκριμένης πρόσκλησης θα πρέπει να λάβει τα επαρκή και κατάλληλα μέτρα για να αποτρέψει κάθε απόρριψη πυρηνικών ή ραδιενεργών αποβλήτων που θα παραβίαζαν την κυριαρχία των κρατών. «Εκφράζει σοβαρή ανησυχία για οποιαδήποτε χρήση πυρηνικών αποβλήτων που θα αποτελούσαν ραδιολογικό πόλεμο

και θα είχε σοβαρές επιπτώσεις στην εθνική ασφάλεια όλων των κρατών» και, για την προώθηση της εφαρμογής της παραγράφου 76 του τελικού εγγράφου της δέκατης ειδικής συνόδου της Συνέλευσης, σχετικά με το θέμα του αφοπλισμού, η οποία ορίζει ότι «Πρέπει να συναφθεί σύμβαση που απαγορεύει την ανάπτυξη, παραγωγή, αποθήκευση και χρήση ραδιολογικών όπλων», το ψήφισμα «ζητά από τη Διάσκεψη για τον αφοπλισμό να λάβει υπόψη, σε οποιοσδήποτε διαπραγματεύσεις για μια σύμβαση σχετικά με την απαγόρευση των ραδιολογικών όπλων, ραδιενεργών αποβλήτων ως μέρος του πεδίου εφαρμογής μιας τέτοιας σύμβασης».

Εκτός αυτού, το ψήφισμα καλεί επίσης τα μη συμβαλλόμενα μέρη της κοινής σύμβασης να γίνουν μέρη της το συντομότερο δυνατό. Όντας ένα παράδειγμα ψηφίσματος που αφορά τα ραδιενεργά απόβλητα με τον ΟΗΕ, πρέπει να σημειωθεί ότι τα ραδιενεργά απόβλητα έχουν επίσης εξεταστεί σε άλλα έγγραφα του ΟΗΕ, όπως η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, που γιορτάστηκε στο Ρίο ντε Τζανέιρο, Ιούνιος 1992, κοινώς γνωστό ως Ατζέντα 21 (Warf, 2014). Το Κεφάλαιο 22 του ασχολείται με την «Ασφαλή και περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων» και ορίζει διαφορετικές δράσεις για τα κράτη να επιτύχουν μέσω διεθνούς συνεργασίας και συντονισμού, στόχος της οποίας είναι να διασφαλιστεί ότι τα ραδιενεργά απόβλητα «Ασφαλής διαχείριση, μεταφορά, αποθήκευση και διάθεση, με σκοπό την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος, σε ένα ευρύτερο πλαίσιο μιας διαδραστικής και ολοκληρωμένης προσέγγισης για τη διαχείριση και την ασφάλεια των ραδιενεργών αποβλήτων» (παρ. 22.3).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για έγγραφο του 1992, είναι κατανοητό ότι ορισμένες από τις προτάσεις του εισήχθησαν στη συνέχεια στην Κοινή Σύμβαση του 1997 (δηλαδή προώθηση πολιτικών για ελαχιστοποίηση και περιορισμό, όπου ενδείκνυται, της παραγωγής ραδιενεργών αποβλήτων και για την ασφαλή επεξεργασία τους, κλιματισμός, μεταφορά και διάθεση). Ωστόσο, προκαλεί έκπληξη η αβεβαιότητα για το ποια ήταν η καλύτερη προσέγγιση για τα ραδιενεργά απόβλητα, καθώς ήταν ενθαρρυντικό να αντικατασταθεί το εθελοντικό μορατόριουμ που ήταν επί του παρόντος σε ισχύ για τη διάθεση αποβλήτων χαμηλού επιπέδου στη θάλασσα από απαγόρευση, γεγονός που συνέστησε μόνο να μην προωθηθεί ή να επιτραπεί η

διάθεση οποιουδήποτε είδους ραδιενεργών αποβλήτων κοντά στη θάλασσα, εκτός εάν υπήρχαν επιστημονικά στοιχεία για την έλλειψη κινδύνων.

Όταν εξετάζουμε το διεθνές πλαίσιο στο οποίο βρίσκεται η διαχείριση της πυρηνικής ενέργειας και των ραδιενεργών αποβλήτων, πρέπει να συνδεθεί με το ψήφισμα 70/1 της UNGA, «Μετασχηματισμός του κόσμου μας: η ατζέντα της βιώσιμης ανάπτυξης του 2030» (G. Assembly, 2010), το οποίο καθορίζει «ένα σχέδιο δράσης». Το σχέδιο εδραιώθηκε με την καθιέρωση δεκαεπτά στόχων αειφόρου ανάπτυξης (SDG) και εκατόν εξήντα εννέα συγκεκριμένους στόχους για την επίτευξη αειφόρου ανάπτυξης και στις τρεις διαστάσεις του: την οικονομική, την κοινωνική και την περιβαλλοντική. Στόχος του είναι τα κράτη μέλη να αξιοποιήσουν τους Αναπτυξιακούς Στόχους της Χιλιετίας (MDG) (UNITED NATIONS. GENERAL ASSEMBLY., 2000) και να επιτύχουν τα μέγιστα για τα έτη από το 2016 έως το 2030.

Ενώ οι δεκαεπτά SDG καλύπτουν τόσο διαφορετικούς τομείς βιωσιμότητας (Díaz Barrado, 2017) στην ανάπτυξη των εθνών, «Χωρίς φτώχεια» (Στόχος 1), «Ισότητα των φύλων» (Στόχος 5), «Υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή» (Στόχος 12) - αυτό που πρέπει να επηρεάσει τις πολιτικές διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων είναι ο Στόχος 7, σχετικά με την «Προσιτή και καθαρή ενέργεια». Στόχος του είναι να εγγυηθεί την πρόσβαση σε προσιτή, αξιόπιστη, βιώσιμη και σύγχρονη ενέργεια για όλους μέσω της εξασφάλισης «καθολικής πρόσβασης σε προσιτές, αξιόπιστες και σύγχρονες ενεργειακές υπηρεσίες» (7.1), αυξάνοντας το «μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα» (7.2 ) και διπλασιασμό του «παγκόσμιου ρυθμού βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης» (7.3) έως το έτος 2030. Ο στόχος 7 είναι ικανός να επηρεάσει, την πυρηνική ενέργεια, καθώς απαιτεί την προώθηση των επενδύσεων σε τεχνολογία καθαρής ενέργειας. Θα ενθαρρυνόταν επίσης από την προοπτική του Στόχου 12, που σχετίζεται με τη λήψη «επείγουσας δράσης για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεών της».

Από την άλλη πλευρά, εάν το μη μολυσματικό χαρακτηριστικό προωθείται από μια ευρύτερη προοπτική, θα μπορούσε να αναφέρεται σε μία πυρηνικοποίηση των ενεργειακών μιγμάτων για όσο διάστημα δεν υπάρχει μέθοδος διάθεσης που να εμποδίζει αυτούς τους επικίνδυνους τύπους αποβλήτων να επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Εν πάση περιπτώσει και για να αντλήσουμε

κάποιες ιδέες, ως απάντηση στην ενθάρρυνση όλων των κρατών μελών να αναπτύξουν εθνικά στρατηγικά σχέδια για την επίτευξη της εφαρμογής της Ατζέντας 2030, για παράδειγμα, η Ισπανία δημοσίευσε το «Plan de Acción para la Implementación de la Agenda 2030» : *Hacia una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*» (*Hacia Una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*, 2018), και όσον αφορά τη στρατηγική που καθορίζεται σε σχέση με τον Στόχο 7, δεν γίνεται περαιτέρω αναφορά στην πυρηνική ενέργεια και τα απόβλητα.

Μία από τις δύο συνθήκες που υπεγράφη στη Ρώμη το 1957 ήταν η Συνθήκη EURATOM. Ο κύριος στόχος του Οργανισμού ήταν να δημιουργήσει ένα κατάλληλο περιβάλλον για τη δημιουργία και ανάπτυξη της πυρηνικής βιομηχανίας. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό, το άρθρο 2 στοιχείο β) της Συνθήκης αναγνωρίζει ότι η Κοινότητα μπορεί «να θεσπίσει ομοιόμορφα πρότυπα ασφάλειας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του γενικού πληθυσμού και να διασφαλίσει την εφαρμογή τους».

Εντός του πεδίου ενδιαφέροντος μας, η απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων αναφέρεται ήδη στη Συνθήκη EURATOM, καθώς το άρθρο 37 ορίζει ότι «κάθε κράτος μέλος παρέχει στην Επιτροπή τέτοια γενικά δεδομένα σχετικά με οποιοδήποτε σχέδιο διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων υπό οποιαδήποτε μορφή θα κάνει είναι δυνατόν να καθοριστεί εάν η εφαρμογή ενός τέτοιου σχεδίου μπορεί να οδηγήσει σε ραδιενεργή μόλυνση του νερού, του εδάφους ή του εναέριου χώρου άλλου κράτους μέλους [...]».

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ της EURATOM και του IAEA βασίζεται στο γεγονός ότι αυτά τα «ομοιόμορφα πρότυπα ασφάλειας» διατυπώνονται με τη μορφή οδηγιών και όχι ως πρότυπα ασφαλείας ως συστάσεις. Επομένως, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να εφαρμόζουν αυτές τις οδηγίες ασφαλείας σε εθνικό επίπεδο και να διασφαλίζουν την επιβολή τους. Όσον αφορά τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, είναι μια ευρέως αποδεκτή αρχή ότι η διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων διέπεται από εθνικές νομοθεσίες, καθώς και από διεθνείς συμβάσεις, όπως η Κοινή Σύμβαση.



Ωστόσο, οι αρχές που περιέχονται σε αυτά τα μέσα συμπληρώνονται με οδηγία στα κράτη μέλη της ΕΕ, παρέχοντας δεσμευτική ισχύ στις αρχές αυτές. Η οδηγία 2011/70 / EURATOM του Συμβουλίου, η οποία επικυρώθηκε στις 19 Ιουλίου 2011, αποσκοπεί στη διασφάλιση υψηλού επιπέδου ασφάλειας, στην επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου διαφάνειας όσον αφορά το κοινό πληροφόρηση και συμμετοχή και αποφυγή της επιβολής αδικαιολόγητων επιβαρύνσεων στις μελλοντικές γενιές μέσω υπεύθυνης και ασφαλούς διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων (άρθρο 1).

Μερικές από τις γενικές αρχές που περιέχονται στην οδηγία είναι οι ακόλουθες: ότι κάθε κράτος είναι υπεύθυνο για την ορθή διαχείριση των αναλωμένων καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων τα οποία έχουν ως χώρα παραγωγής το ίδιο το κράτος αναφοράς (άρθρο 4.1), ότι η παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων θα είναι διατηρείται στο ελάχιστο και το κόστος της διαχείρισης που βαρύνει εκείνους που τα παρήγαγαν (άρθρο 4.3), ότι τα ραδιενεργά απόβλητα θα διατίθενται στο κράτος μέλος στο οποίο δημιουργήθηκαν, εκτός εάν υπάρχει συμφωνία με άλλο κράτος μέλος ή τρίτο χώρα να χρησιμοποιήσει εγκατάσταση διάθεσης σε μία από αυτές, οπότε θα πρέπει να τηρηθούν ορισμένα πρότυπα (άρθρο 4.4), ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να θέτουν σε πράξη τη θέσπιση και τη διατήρηση ενός εθνικού νομοθετικού, κανονιστικού και οργανωτικού πλαισίου για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων (άρθρο 5.1), ή ότι κάθε κράτος μέλος πρέπει να ιδρύσει αρμόδια ρυθμιστική αρχή σε αυτόν τον τομέα (άρθρο 6.1).

Όπως και η κοινή σύμβαση στο πλαίσιο του ΙΑΕΑ, η παρούσα οδηγία συντάσσει επίσης μια διαδικασία υποβολής εκθέσεων για αξιολόγηση από ομοτίμους. Τα κράτη μέλη οφείλουν να δεσμευτούν να παρουσιάζουν εκθέσεις οι οποίες να παραθέτουν τα σχετικά με την εφαρμογή της οδηγίας. Η πρώτη ήταν τον Αύγουστο του 2015, αλλά στη συνέχεια πρέπει να υποβάλλονται κάθε τρία χρόνια (άρθρο 14).

Σε ότι αφορά την Ελλάδα, σύμφωνα με το Προεδρικό Διάταγμα 91 (ΦΕΚ Α 130/01.09.2017), με τίτλο «Νομοθετικό, ρυθμιστικό και οργανωτικό πλαίσιο για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων» εντός του οποίου παρατίθεται και η τροποποίηση του Π.Δ. 122/2013, αναφέρεται κατ' άρθρο 1 ότι «Για τα ραδιενεργά απόβλητα τα οποία δημιουργούνται ή

προκύπτουν εντός της ελληνικής επικράτειας από φορέα, φυσικό ή νομικό πρόσωπο, που ανήκει στη δικαιοδοσία άλλης χώρας ή για κάθε μορφής ραδιενεργών προϊόντων ή αποβλήτων που ενδεχομένως προκύψουν από επεξεργασία υλικών ή αποβλήτων που ανήκουν σε άλλη χώρα, τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν σε εγκεκριμένο από την ΕΕΑΕ χώρο, για μέγιστη συνολική χρονική διάρκεια αποθήκευσης έξι (6) μηνών, μετά την πάροδο της οποίας επανεξάγονται στη χώρα προέλευσης. Ο φορέας, φυσικό ή νομικό πρόσωπο διατηρεί την κύρια και πλήρη ευθύνη για τα ραδιενεργά αυτά προϊόντα ή απόβλητα, τα οποία παραμένουν στη δικαιοδοσία της χώρας αυτού».

Η αποδοχή του κοινού διαδραματίζει έναν αυξανόμενο ρόλο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την τοποθέτηση νέων εγκαταστάσεων διάθεσης αποβλήτων και αυτό εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την αντίληψη του κινδύνου, η οποία ως εκ τούτου αποτελεί σημαντικό ζήτημα για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Η κοινωνική αποδοχή του κινδύνου εξαρτάται από τις αντιλήψεις για τον κίνδυνο και το όφελος και αυτές οι αντιλήψεις βασίζονται μόνο εν μέρει σε επιστημονικές αξιολογήσεις. Το κοινό αντιλαμβάνεται γενικά ότι τόσο η ραδιενεργή όσο και η διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων είναι δραστηριότητες υψηλού κινδύνου, αναγνωρίζοντας ότι τα υλικά ενέχουν υψηλούς εγγενείς κινδύνους και πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά για να αποφευχθούν τραυματισμοί (*Nuclear Energy Agency (NEA) - Radioactive Waste Management, n.d.*).

Οι άμεσες συγκρίσεις μεταξύ διαχείρισης ραδιενεργών και επικίνδυνων αποβλήτων πρέπει να γίνουν πολύ προσεκτικά, διότι τα πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά κινδύνου των δύο τύπων αποβλήτων απαιτούν διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας για να διασφαλιστεί η ασφάλεια. Ωστόσο, υπάρχουν θεμελιώδεις και ουσιαστικές ομοιότητες: τόσο τα ραδιενεργά όσο και τα επικίνδυνα απόβλητα έχουν τη δυνατότητα, εάν δεν αντιμετωπιστούν κατάλληλα, να προκαλέσουν περιβαλλοντικές βλάβες και να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία για τα απόβλητα που διατίθενται σε αποθετήριο, το κύριο μέλημα και για τους δύο τύπους είναι ο κίνδυνος που παρουσιάζεται με μεταφορά στη βιόσφαιρα μέσω μεταφοράς νερού (*Nuclear Energy Agency (NEA) - Radioactive Waste Management, n.d.*).

Ο κύριος κίνδυνος από τα πυρηνικά απόβλητα για τους ανθρώπους προέρχεται από τη ραδιενεργή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία έχει κυρίως σωματικά αποτελέσματα και γενετικά αποτελέσματα. Οι φυσικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν κυρίως:

(1) οξύ τραυματισμό: βλάβη που προκαλείται από μεγάλες δόσεις του ανθρώπινου σώματος σε σύντομο χρονικό διάστημα

(2) χρόνιος τραυματισμός: προκαλείται από ακτινοβολία χαμηλής δόσης μακροπρόθεσμων, υπερβολικά επιτρεπόμενων ορίων δόσης.

(3) Μακροχρόνιες επιδράσεις: αναφέρεται στις επιδράσεις που εμφανίζονται μετά από 6 μήνες έκθεσης, συμπεριλαμβανομένων κυρίως της λευχαιμίας, της απλαστικής αναιμίας, των κακοήθων όγκων, του καταρράκτη και των επιδράσεων στα έμβρυα (Liu & Dai, 2019).

Ταυτόχρονα, τα πυρηνικά απόβλητα μπορούν επίσης να μολύνουν το περιβάλλον. Τα ραδιονουκλεΐδια σε υπόγεια πυρηνικά απόβλητα εκπέμπουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποσύνθεσης, η οποία ισοδυναμεί με προσάρτηση πηγής θερμότητας στο υπόγειο μέσο πεδίο. Η ύπαρξη πηγής θερμότητας αλλάζει πρώτα την κατανομή θερμοκρασίας του υπόγειου μέσου πεδίου και η αλλαγή θερμοκρασίας επηρεάζει τη μετανάστευση ρευστού επηρεάζοντας το ιξώδες ρευστού και την πυκνότητα υγρού και επίσης αλλάζει τις χημικές ιδιότητες ορισμένων ουσιών, επηρεάζοντας έτσι άμεσα το περιβάλλον. Επιπλέον, οι αλλαγές θερμοκρασίας μπορεί επίσης να προκαλέσουν το άνοιγμα και το κλείσιμο ενδεχόμενης ρωγμής, η οποία επηρεάζει το υπόγειο πεδίο πίεσης. Επομένως, η ύπαρξη πηγών θερμότητας έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στο περιβάλλον, αλλά συγκεντρώνεται κυρίως στις τοπικές περιοχές. Επιπλέον, τα νουκλεΐδια των στερεοποιημένων αποβλήτων μπορεί να εκπλυθούν από το δοχείο συσκευασίας και μπορεί να εισέλθουν στη βιόσφαιρα καθώς μετακινούνται στα υπόγεια ύδατα, επηρεάζοντας έτσι το ανθρώπινο περιβάλλον (Hou & Roos, 2008).

Τα πυρηνικά απόβλητα μπορούν να εκπέμπουν διάφορους τύπους ακτινοβολίας: σωματίδια άλφα, σωματίδια βήτα και ακτίνες γάμμα. Ενώ τα σωματίδια άλφα σταματούν πιο εύκολα, ακόμη και από λεπτά φράγματα όπως το χαρτί, τα αποτελέσματά τους είναι ιδιαίτερα επιβλαβή. Είναι πολύ επιζήμια όταν εισπνέεται ή

κατά την κατάποση και έχουν συντελεστή στάθμισης ακτινοβολίας 20 φορές μεγαλύτερο από τις ακτίνες γάμμα ανά μονάδα έκθεσης. Τα σωματίδια βήτα θεωρούνται ότι διεισδύουν περισσότερο από τα σωματίδια άλφα, αν και μπορούν ακόμη να εξασθενηθούν από πυκνότερα υλικά όπως πλαστικό και αλουμίνιο. Οι ακτίνες γάμμα είναι πολύ διεισδυτικές. Απαιτούνται πυκνά υλικά όπως μόλυβδος και παχύ σκυρόδεμα για την εξασθένησή τους (*World Nuclear Waste Report*, n.d.).

Η ακτινοβολία από ραδιενεργά απόβλητα είναι καρκινογόνος, μεταλλαξιογόνος και τερατογόνος (μια τερατογόνος ουσία είναι αυτή που μπορεί να βλάψει ένα έμβρυο). Οι κίνδυνοι ραδιογενετικού καρκίνου εξαρτώνται από τον τύπο του καρκίνου, τους ιστούς που εκτίθενται, τη δόση, τον ρυθμό δόσης και τον τύπο της ακτινοβολίας. Ο τελικός κίνδυνος για τα άτομα θα εξαρτηθεί επίσης από το φύλο, την ηλικία και τον χρόνο που έχει παρέλθει από την έκθεση. Η ακτινοβολία εμπλέκεται επίσης όλο και περισσότερο σε ένα ευρύ φάσμα άλλων ασθενειών, όπως καρδιαγγειακές παθήσεις, εγκεφαλικά επεισόδια, καταρράκτης στους οφθαλμούς και ψυχικές επιπτώσεις. Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Ακτινολογικής Προστασίας (ICRP), μια εξωτερική δόση ακτινοβολίας ολόκληρου του σώματος (Sv) έχει ως αποτέλεσμα περίπου δέκα τοις εκατό κίνδυνο θανατηφόρου καρκίνου σε ενήλικες (*World Nuclear Waste Report*, n.d.).

Ωστόσο, το ICRP μείωσε αργότερα την εκτίμησή του κατά μισό έως πέντε τοις εκατό μέσω της χρήσης ενός παράγοντα αποτελεσματικότητας δόσης και δοσολογίας (DDREF) για στερεούς καρκίνους. Τα DDREF χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για τη μείωση των κινδύνων που απορρέουν από την έκθεση των επιζώντων από ιαπωνικές βόμβες σε χαμηλή δόση ακτινοβολίας. Μελέτες έδειξαν ότι αυτές οι εκθέσεις ήταν λιγότερο επιβλαβείς από αυτές σε υψηλότερες δόσεις με υψηλότερα ποσοστά δόσης. Πιο πρόσφατες μελέτες σε ανθρώπους έχουν δείξει ότι η χρήση των DDREFs είναι εσφαλμένη (*World Nuclear Waste Report*, n.d.).

Από το 2013, οι περισσότεροι διεθνείς οργανισμοί έχουν σταματήσει να χρησιμοποιούν τα DDREF, οπότε ο πραγματικός κίνδυνος θανατηφόρου καρκίνου έχει αυξηθεί σε τουλάχιστον 10 τοις εκατό ανά Sv. Δυστυχώς, το ICRP δεν σταμάτησε να χρησιμοποιεί DDREFs. Έτσι, οι κυβερνήσεις και το ICRP δεν έχουν αναγνωρίσει τους αντιληπτούς αυξημένους κινδύνους της ακτινοβολίας, ούτε τα

αυστηρότερα όρια ακτινοβολίας. Δεν υπάρχει ακόμη διεθνής συναίνεση σχετικά με τους κινδύνους της ακτινοβολίας. Αυτό που είναι σαφές, ωστόσο, είναι ότι οι συστάσεις του ICRP είναι συντηρητικές (*World Nuclear Waste Report*, n.d.).

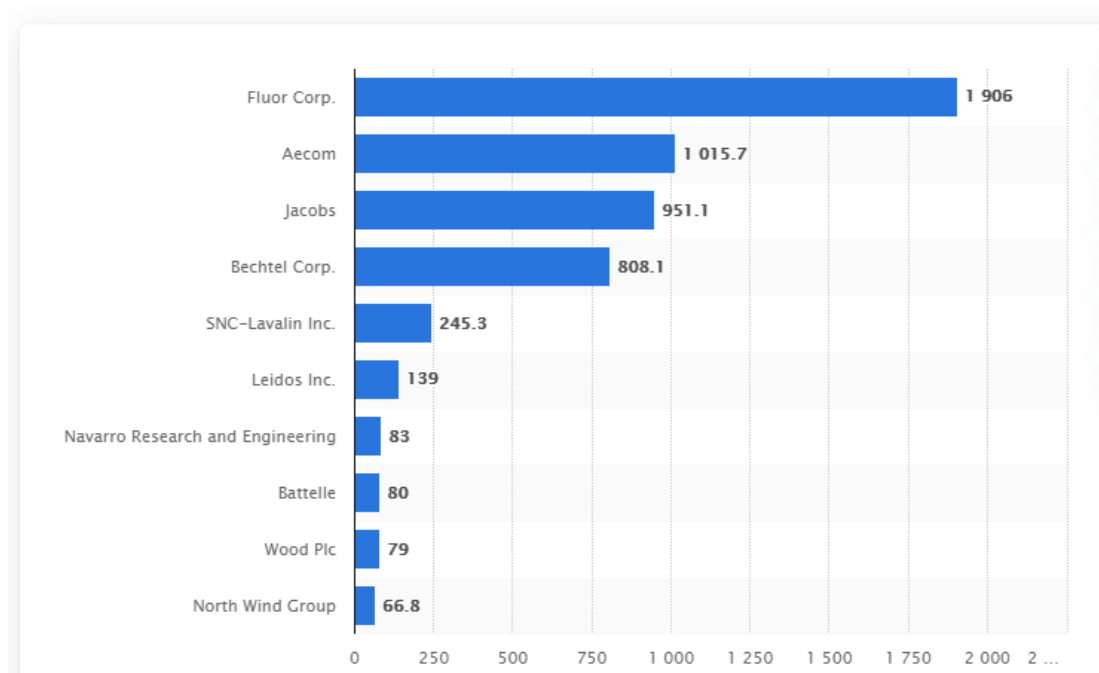
Τα ραδιενεργά απόβλητα μπορούν να περιέχουν ένα ευρύ φάσμα ραδιονουκλεϊδίων, των οποίων τα άτομα είναι ασταθή. Όταν οι πυρήνες τους αποσυντίθενται, εκπέμπουν διάφορες μορφές ακτινοβολίας. Πολλά από αυτά τα άτομα έχουν υψηλή ραδιοτοξικότητα, που είναι ο βαθμός στον οποίο ένα ραδιονουκλεϊδιο μπορεί να βλάψει έναν οργανισμό. Ο χρόνος ημίσειας ζωής τους, ο χρόνος που απαιτείται για το ήμισυ του αρχικού ποσού που υπάρχει μέχρι την αποσύνθεση, είναι συχνά εξαιρετικά μεγάλος, μπορεί να είναι χιλιάδες ή και εκατομμύρια χρόνια. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος ραδιονουκλιδίου για έναν οργανισμό, είναι σημαντικοί οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Λειτουργίες ραδιενεργού αποσύνθεσης: η εκπομπή σωματιδίων άλφα, σωματιδίων βήτα και ακτίνων γάμμα
- χημικές ενώσεις που περιέχουν το ραδιοϊσότοπο
- Διαλυτότητα στο νερό
- τρόποι μεταφοράς μέσω του περιβάλλοντος
- σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα: η αναλογία βλάβης από έναν τύπο ακτινοβολίας σε σχέση με άλλο, δεδομένης της ίδιας ποσότητας απορροφημένης ενέργειας
- ραδιοτοξικότητα: συνήθως βασίζεται σε συγκεκριμένη δραστηριότητα, που αναφέρεται ως ραδιενέργεια σε becquerel (Bq) ανά γραμμάριο
- συντελεστής μετατροπής δόσης.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εκθέσεις θα είναι εσωτερικές παρά εξωτερικές, επομένως οι δόσεις και οι κίνδυνοι θα εξαρτηθούν επίσης από τους ρυθμούς πρόσληψης, τους μεταβολισμούς και τα ποσοστά απέκκρισης στον άνθρωπο (*World Nuclear Waste Report*, n.d.).

Κανένα κατάλληλο σχήμα ταξινόμησης κινδύνων δεν έχει λάβει ακόμη υπόψη τους παραπάνω παράγοντες για τα ραδιονουκλεϊδια. Τέτοια συστήματα υπάρχουν ήδη για

χημικά και βιοκτόνα, και έχουν γίνει κλήσεις για τη δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος για τα ραδιενεργά απόβλητα.

*Εικόνα 14. Κορυφαίες εταιρείες στην αγορά πυρηνικών αποβλήτων παγκοσμίως με βάση τα έσοδα το 2018 (σε εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ) (Wastewater Treatment Companies Based on Revenue Globally 2017 | Statista, n.d.)*



---

## *Κεφάλαιο 5°*

### *Σύγχρονες και μελλοντικές τεχνολογίες διαχείρισης*

---

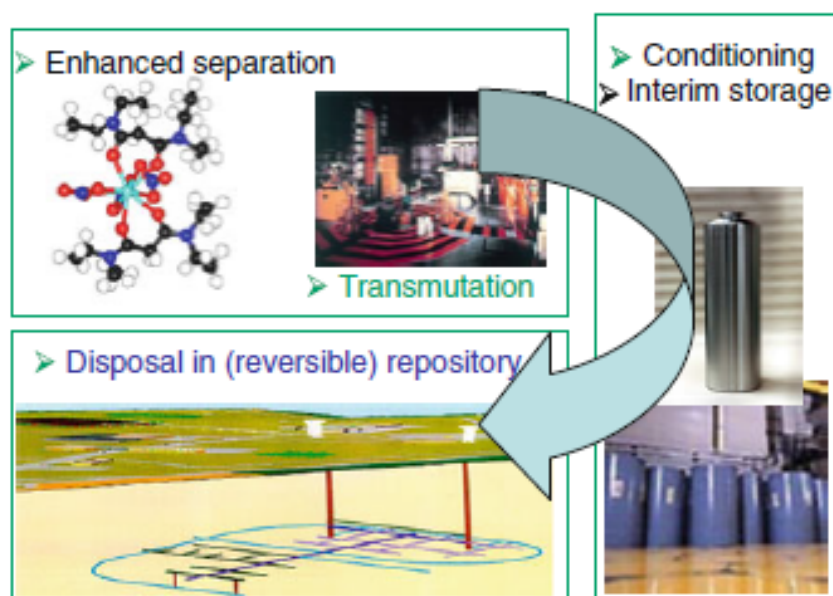
Υπήρξαν πολλές αποτυχίες και μερικές επιτυχίες στη χωροθέτηση, ανάπτυξη, αδειοδότηση και λειτουργία γεωλογικών αποθετηρίων. Δεν υπάρχουν σήμερα λειτουργικά αποθετήρια για διάθεση αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου - Spent Nuclear Fuel (SNF). Ωστόσο, οι Ηνωμένες Πολιτείες λειτουργούν ένα γεωλογικό αποθετήριο - το πιλοτικό εργοστάσιο απομόνωσης αποβλήτων (Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)) για αμυντικά απόβλητα με μικρές συγκεντρώσεις διαουρανικών στοιχείων (πλουτώνιο κ.λπ.). Το WIPP βρίσκεται στο δέκατο έτος λειτουργίας του. Η Σουηδία και η Φινλανδία έχουν τοποθετήσει γεωλογικά αποθετήρια για SNF κοντά σε υπάρχουσες θέσεις αντιδραστήρων με δημόσια αποδοχή. Και οι δύο χώρες βρίσκονται στη διαδικασία αδειοδότησης αυτών των εγκαταστάσεων. Πολλά γεωλογικά αποθετήρια για την απόρριψη μακροχρόνιων χημικών αποβλήτων (κυρίως βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος) λειτουργούν στην Ευρώπη εδώ και δεκαετίες (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

Τα επιτυχημένα προγράμματα αποθήκευσης έχουν αρκετά καθοριστικά χαρακτηριστικά: οι παραγωγοί αποβλήτων συμμετέχουν στα προγράμματα. Υπάρχει μακροπρόθεσμη συνέχεια και χρηματοδότηση, και τα προγράμματα χαρακτηρίζονται από διαφάνεια, σημαντικές προσπάθειες για τη δημόσια προσέγγιση και υποστήριξη από τις τοπικές κοινότητες. Σε χώρες όπως η Σουηδία, αυτή η στρατηγική είχε ως αποτέλεσμα αρκετές κοινότητες να είναι πρόθυμες να φιλοξενήσουν το αποθετήριο. Τέλος, τα προγράμματα ως πολιτική εξέτασαν πολλές παραμέτρους και τεχνολογίες για να παρέχουν (1) εναλλακτικές επιλογές εάν κάποια προσέγγιση απέτυχε και (2) την εμπιστοσύνη στο πρόγραμμα. Το σουηδικό πρόγραμμα εξέτασε πολλές τοποθεσίες και δύο τεχνολογίες (γεωλογική διάθεση και γεωτρήσεις). Το γαλλικό πρόγραμμα περιλαμβάνει τρεις επιλογές (άμεση διάθεση, αποθήκευση πολλών ετών και καταστροφή αποβλήτων) (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

Στην ιδανική περίπτωση, ένας οργανισμός διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων θα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- (1) αρχή για την επιλογή ισότοπων σε συνεργασία με κυβερνήσεις και κοινότητες,
- (2) αρχή διαχείρισης κεφαλαίων διάθεσης πυρηνικών αποβλήτων,
- (3) εξουσία διαπραγμάτευσης με ιδιοκτήτες εγκαταστάσεων σχετικά με το SNF και την αφαίρεση αποβλήτων,
- (4) συνεργασία με φορείς χάραξης πολιτικής και ρυθμιστικές αρχές σχετικά με τις επιλογές κύκλου καυσίμου που επηρεάζουν τη φύση των ροών ραδιενεργών αποβλήτων, και
- (5) μακροπρόθεσμη συνέχεια στη διαχείριση. Αυτά τα χαρακτηριστικά δεν είναι αναγνωρίσιμα μέχρι σήμερα στο πρόγραμμα των ΗΠΑ (U.S. Department of Energy, 2020).

Εικόνα 15. Επιλογές για τη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων μακράς διάρκειας (Cacuci, 2010)





Σήμερα, η γεωλογική διάθεση θεωρείται η προτιμώμενη επιλογή για την απόρριψη μακροχρόνιων αποβλήτων που πρέπει να απομονωθούν από τη βιόσφαιρα για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Τόσο τα ραδιενεργά όσο και τα χημικά απόβλητα απορρίπτονται σε γεωλογικά αποθετήρια. Τα χημικά απόβλητα είναι κυρίως εκείνα που περιέχουν στοιχεία που είναι τοξικά, διαρκούν για χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί μεγάλο και δεν δύνανται να καταστραφούν - όπως μόλυβδος, αρσενικό και κάδμιο. Το πρώτο λειτουργικό γεωλογικό αποθετήριο ήταν το αποθετήριο Herfa Neugode για χημικά απόβλητα στη Γερμανία. Έκτοτε, πρόσθετα γεωλογικά αποθετήρια έχουν ανοίξει στην Ευρώπη για χημικά απόβλητα. Το μόνο λειτουργικό αποθετήριο για μακροχρόνια ραδιενεργά απόβλητα είναι το WIPP στο Νέο Μεξικό. Δεν υπάρχει αποθετήριο λειτουργίας για τη διάθεση των HLW και SNF (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

Η ανάπτυξη γεωλογικών αποθετηρίων παγκοσμίως σε πολλούς τύπους γεωλογίας παρέχει μια ισχυρή επιστημονική και τεχνική κατανόηση του τι απαιτείται για το σχεδιασμό, την κατασκευή και λειτουργία τέτοιων εγκαταστάσεων. Εντός των Ηνωμένων Πολιτειών, η χωροθέτηση, ο σχεδιασμός, η αδειοδότηση, η κατασκευή και η λειτουργία του WIPP παρέχει εμπειρία σε αποθετήρια για απόβλητα ενδιάμεσου επιπέδου. Παράλληλα, το Yucca Mountain Project ήταν η πρώτη σημαντική τεχνική προσπάθεια των Ηνωμένων Πολιτειών για το σχεδιασμό και την αδειοδότηση ενός γεωλογικού αποθετηρίου για SNF και HLW (Ialenti, 2021). Μεγάλο μέρος της επιστημονικής κατανόησης των αποθετηρίων και της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε ισχύει για οποιοδήποτε μελλοντικό αποθετήριο (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

Υπάρχουν τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωλογικών αποθετηρίων που είναι σημαντικά κατανοητά όσον αφορά τους κύκλους καυσίμων και την πολιτική:

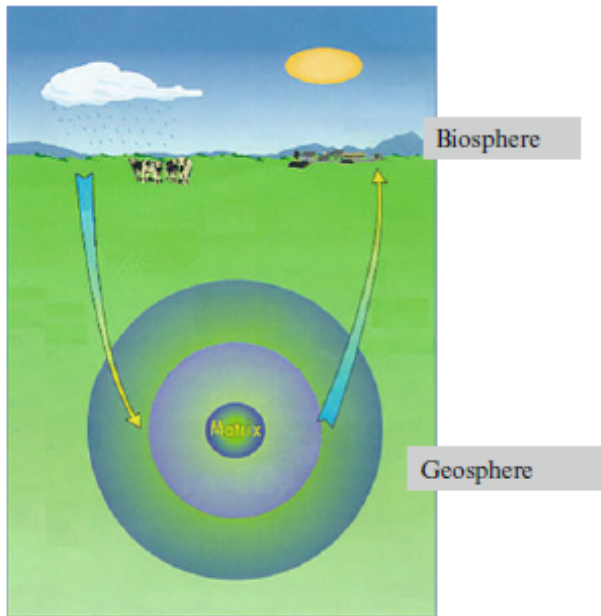
- Τα γεωλογικά αποθετήρια βρίσκονται μερικές εκατοντάδες μέτρα υπόγεια για να προστατεύσουν την περιοχή διάθεσης από φυσικά και ανθρωπογενή γεγονότα (διάβρωση, παγετώνας, πόλεμος).

- Η χωρητικότητα των αποθετηρίων δεν περιορίζεται από τον όγκο ή τη μάζα
- Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς ραδιονουκλεϊδίων από το αποθετήριο στη βιόσφαιρα είναι από τα υπόγεια ύδατα και η χρήση αυτών των υπόγειων υδάτων για πόσιμο νερό ή καλλιέργεια τροφίμων. Η τοπική γεωχημεία καθορίζει ποια ραδιονουκλεΐδια μπορούν να μεταφερθούν από τα υπόγεια ύδατα και συνεπώς πιθανώς να διαφύγουν από ένα αποθετήριο. Στα περισσότερα περιβάλλοντα αποθετηρίου, τα σωματίδια (πλουτόνιο, κ.λπ.) δεν αναμένεται να διαφύγουν από το αποθετήριο λόγω της χαμηλής διαλυτότητάς τους στα υπόγεια ύδατα και της προσρόφησης τους.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις (πχ ηφαιστειακή δραστηριότητα, ανθρώπινη διείσδυση, κ.λπ.), οι ακτινίδες γίνονται σημαντικοί συντελεστές του κινδύνου.
- Οι μέγιστες θερμοκρασίες σε ένα αποθετήριο πρέπει να περιορίζονται για να μπορέσει να επιτευχθεί η αποφυγή της υποβάθμισης της απόδοσης του αποθετηρίου. Η ραδιενεργή αποσύνθεση παράγει θερμότητα. Για τη μείωση του μεγέθους και του κόστους ενός αποθετηρίου, τα προγράμματα αποθήκευσης αποθηκεύουν SNF και HLW για 40 έως 60 χρόνια πριν από τη διάθεση για να μειώσουν τη θερμότητα αποσύνθεσης. Εναλλακτικά, ένα αποθετήριο μπορεί να έχει ενεργό εξαερισμό για αρκετές δεκαετίες ενώ η θερμότητα αποσύνθεσης μειώνεται.
- Τα κίνητρα για την καύση ραδιονουκλεϊδίων σε αντιδραστήρες για τη βελτίωση της απόδοσης των αποθετηρίων είναι περιορισμένα (Massachusetts Institute of Technology, 2011).

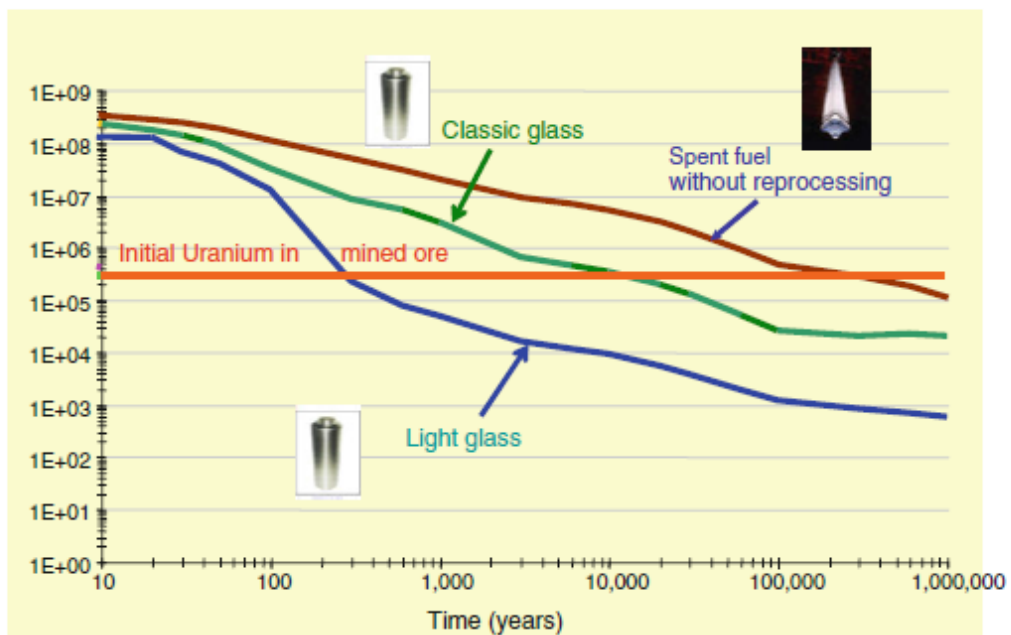
Οι καμπύλες της ραδιοτοξικότητας έναντι του χρόνου δίνουν το χρονοδιάγραμμα που απαιτείται για αυτήν την καθυστέρηση. Είναι της τάξης των 100000 ετών για αναλωμένο καύσιμο, αρκετές χιλιάδες χρόνια για «κλασικό» γυαλί και αρκετές εκατοντάδες χρόνια για «ελαφρύ» γυαλί. Η πρόκληση είναι να προβλεφθεί η εξέλιξη του αποθετηρίου τα επόμενα 100.000 χρόνια. Δεν είναι δυνατή η άμεση επίδειξη. Κάποιος μπορεί να προσπαθήσει να πείσει (τον εαυτό του και άλλους) μόνο μέσω μοντελοποίησης και μερικών πειραμάτων.



Εικόνα 16. Η έννοια πολλαπλών επιπέδων εφαρμόστηκε στη βαθιά γεωλογική διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων (Casuci, 2010)



Εικόνα 17. Σύγκριση της ραδιοτοξικότητας αναλωμένου καυσίμου και απορριμμάτων HL από την επανεπεξεργασία (Casuci, 2010)



Η χημική ανθεκτικότητα των πυρηνικών αποβλήτων καθορίζει τη στοιχειακή απελευθέρωση και καθορίζει τη μακροπρόθεσμη απόδοση της μορφής των αποβλήτων. Ωστόσο, η ανθεκτικότητα δεν αποτελεί την εγγενή ιδιότητα του υλικού αλλά επηρεάζεται από ελεγχόμενες παραμέτρους κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι δοκιμές μπορούν να διεξαχθούν με ποικίλους τρόπους που περιλαμβάνουν τον λόγο επιφάνειας προς όγκο ( $SA / V$ ) για να τονιστεί η χημεία του διαλύματος ή η χημεία των υλικών. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι δοκιμής για τη μελέτη της υδατικής συμπεριφοράς έκπλυσης περιλαμβάνουν τη δοκιμή συνέπειας προϊόντος (PCT) (ASTM C1285), το Materials Characterization Center (MCC) -1 και τα πρότυπα MCC-3, τη δοκιμή ενυδάτωσης ατμών (VHT) (ASTM C1663), και τη μονή διέλευση (SPFT). Οι δοκιμές MCC-1 και VHT χρησιμοποιούν ένα μονολιθικό δείγμα, ενώ οι δοκιμές MCC-3 και PCT χρησιμοποιούν σκόνη θρυμματισμένου δείγματος με τυπική επιφάνεια επιφάνειας 2000 mm. Το SPFT είναι μια δυναμική δοκιμή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού διάλυσης και αναπτύχθηκε επίσης για ομοιογενείς μορφές απορριμμάτων. Οι τυπικές δοκιμές δεν έχουν αναπτυχθεί αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της αντοχής των υλικών με πιο περίπλοκες μικροδομές όπως πολυφασικά κρυσταλλικά κεραμικά (Clark et al., 2021).

Τα ραδιονουκλεΐδια υπάρχουν φυσικά και τεχνητά (Gavrilescu et al., 2009) και αποτελούν σοβαρό πρόβλημα όταν εντοπίζονται στο περιβάλλον, επειδή η τροφική αλυσίδα αποτελεί μία βασική παράμετρο μετάδοσης στον άνθρωπο, επηρεάζοντας τη μεταβολική διαδικασία (Ali et al., 2011) προκαλώντας ασθένειες στον άνθρωπο. Τα ραδιονουκλεΐδια έχουν βρεθεί σε ιζήματα από πυρηνικές εγκαταστάσεις: προϊόντα σχάσης ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  και  $^{134}\text{Cs}$ ), προϊόντα ενεργοποίησης ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  και  $^{65}\text{Zn}$ ) και υπερουράνια στοιχεία ( $^{239}\text{Pu}$  και  $^{241}\text{Am}$ ). Αρκετές δοκιμές στην ατμόσφαιρα αποκάλυψαν την παρουσία ραδιονουκλεϊδίων όπως  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  και  $^{239}\text{Pu}$ . Επίσης, έχουν βρεθεί φυσικό ουράνιο, θόριο και  $^{40}\text{K}$  (Rosson et al., 2001).

Η γεωχημική συμπεριφορά των ραδιονουκλεϊδίων είναι ενδιαφέρουσα σε ό,τι αφορά τα απόβλητα της χημικής βιομηχανίας και της ασφάλειας των μακροπρόθεσμων εναποθέσεων ραδιενεργών αποβλήτων (Sun et al., 2014). Επομένως, η αποκατάσταση μολυσμένων εδαφών με ραδιονουκλεΐδια αποτελεί μία σύγχρονη προοπτική διαχείρισης αποβλήτων (Zhu & Shaw, 2000).

Τα ραδιενεργά απόβλητα αποτελούνται από υλικά που δεν είναι πλέον χρήσιμα και πρέπει να διατηρούνται απομονωμένα από το περιβάλλον εάν τα επίπεδα ραδιενέργειας είναι επιβλαβή. Τα ραδιενεργά απόβλητα προέρχονται από: α) μεταλλεύματα ουρανίου και θορίου, β) διεργασίες κύκλου πυρηνικών καυσίμων, γ) πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, δ) απολύμανση πυρηνικών εγκαταστάσεων, ε) χρήση ισοτόπων στην ιατρική, την έρευνα και τη γεωργία. Τα υγρά ραδιενεργά απόβλητα παρουσιάζουν ένα μεγάλο πρόβλημα, λόγω των μεγάλων όγκων και της σύνθετης χημικής και ραδιοχημικής σύνθεσής του (Pátzay et al., 2006).

Η ασφαλής απόρριψη υγρών ραδιενεργών αποβλήτων στο περιβάλλον πρέπει να πληροί πολύ αυστηρές απαιτήσεις όπως τα όρια των ραδιενεργών ουσιών και άλλων αποβλήτων. Για την επίτευξη των προτύπων που περιγράφονται στους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς, τα απόβλητα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία για να μειωθεί ο όγκος και η συγκέντρωση ραδιενεργών ενώσεων και άλλων τοξικών διαλυμάτων στα λύματα (Ambashta & Sillanpää, 2012). Πολλές μέθοδοι είναι διαθέσιμες για επεξεργασία υγρών ραδιενεργών αποβλήτων, κυρίως εξάτμιση, καθίζηση, ανταλλαγή ιόντων και προσρόφιση. Ένας μέγιστος παράγοντας απολύμανσης και μια σημαντική μείωση του όγκου των μολυσμένων υδατικών διαλυμάτων είναι σημαντικές στις διαδικασίες απολύμανσης (Yeritsyan et al., 2007).

## Οι ζεόλιθοι

Οι ζεόλιθοι είναι μια οικογένεια αργιλοπυριτικών αλάτων με 3 μικροπόρους. Ο γενικός τύπος τους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:  $M_x / n ((AlO_2)_x (AlO_2)_y) (H_2O)_z$ , όπου το  $M$  αντιπροσωπεύει ένα κατιόν εκτός πλαισίου του σθένους  $n$ , το οποίο αντισταθμίζει τα αρνητικά φορτία του πλαισίου και επιτρέπει τον ζεόλιθο για να είναι εναλλάκτης κατιόντων. Το  $TO_4$  ( $T$ : Si ή Al) που συνδέεται μεταξύ τους συμμορφώνεται με το πλαίσιο. Επομένως, διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης οδηγούν σε ποικιλία ζεόλιθων και είναι γνωστοί εκατοντάδες ζεόλιθοι. Τα πλαίσια σχηματίζονται από δακτυλίους που αντιστοιχούν σε ανοίγματα πόρων από ζεόλιθους και σύμφωνα με το μέγεθος αυτών των δακτυλίων οι ζεόλιθοι θεωρούνται σαν μικρού πορώδους

(8-δακτύλιος), μεσαίου πορώδους (10-δακτύλιος), μεγάλου πορώδους (12-δακτυλίων) και ζεόλιθοι πολύ μεγάλου πορώδους (> 12 δακτύλιοι). Η International Zeolite Association έχει εκχωρήσει έναν κωδικό τριών γραμμάτων για την αναγνώρισή τους (Auerbach et al., 2003). Για παράδειγμα: FAU (12-Ring, X, Y, Faujasite), MOR (12-Ring και 8-Ring: Mordenite), HEU (10-Ring και 8-Rings: Heulandite, Clinoptilolite), CHA (8-Ring: chabazite), LTA (8-Ring: A). Ο κλινοπτιλόλιθος - Clinoptilolite είναι ένας από τους πιο άφθονους ζεόλιθους στη φύση, οι κρύσταλλοι του έχουν μονοκλινική συμμετρία (Jiménez-Reyes et al., 2021).

Οι ζεόλιθοι έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες λόγω του ρυθμιζόμενου μεγέθους πόρων, έχουν χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των συστατικών αερίου. Εναλλακτικά, οι ζεόλιθοι είναι εξαιρετικοί προσροφητές ιόντων βαρέων μετάλλων από υδατικά διαλύματα. Αυτά τα υλικά έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλή τιμή, μεγάλη χωρητικότητα ανταλλαγής ιόντων, εξαιρετική επιλεκτικότητα και θερμική και σταθερότητα ακτινοβολίας. Είναι φιλικά προς το περιβάλλον με καλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, υψηλή ικανότητα απορρόφησης και ικανότητα προσαρμογής του pH του υδατικού συστήματος. Οι ζεόλιθοι έχουν συντεθεί, τόσο φυσικά όσο και συνθετικά, και μπορούν να τροποποιηθούν για να βελτιώσουν τις ιδιότητες προσρόφησης τους, όχι μόνο για να βελτιώσουν τις ιδιότητες προσρόφησης κατιόντων τους, αλλά και για να προσροφήσουν ανιονικά είδη, μη πολικά οργανικά είδη και παθογόνα από υδατικά ρεύματα (Ibrahim & Aladsani, 2016). Έχουν επίσης συντεθεί σύνθετα υλικά ζεόλιθων με μεταλλικά στοιχεία ή νανοσωματίδια (Koohsaryan & Anbia, 2016). Μεταξύ των χρήσεων των ζεόλιθων είναι η κατάλυση σε πετροχημικές βιομηχανίες, μετατροπή βιομάζας, κυψέλες καυσίμου, αποθήκευση θερμικής ενέργειας, δέσμευση και μετατροπή CO<sub>2</sub>, αποκατάσταση ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθαρισμός νερού (Li et al., 2017), βιοτεχνολογία και ιατρική (Bacakova et al., 2018).

Η υψηλή προσροφητική και ιοντο-ανταλλακτική ικανότητα αυτών των υλικών εξαρτώνται από τη δομή που μοιάζει με το δίκτυο και την αναλογία Si / Al. Ο κύριος μηχανισμός για την απομάκρυνση των ραδιονουκλεϊδίων είναι η ανταλλαγή ιόντων επειδή τα κατιόντα από τη δομή του ζεόλιθου μπορούν να ανταλλάσσονται με κατιόντα σε υδατικά διαλύματα (Fang et al., 2017). Οι ιδιότητες ανταλλαγής ιόντων

των ζεολίθων αποτελούν τη βάση για την εφαρμογή τους στην περιβαλλοντική αποκατάσταση.

Οι βιομηχανικές επεξεργασίες λυμάτων αποτελούν άλλη σχετική εφαρμογή ζεολίθων. Μελετήθηκε η απομάκρυνση μαγγανίου, κοβαλτίου και νικελίου από βιομηχανικά αμμωνιακά απόβλητα με χρήση ενός τροποποιημένου με αμμώνιο κουβανικού κλινοπιτόλιθου. Αυτά τα μέταλλα απομακρύνθηκαν από μικτά υδατικά διαλύματα. Ο τροποποιημένος ζεόλιθος απομάκρυνε επιλεκτικά τα  $\text{Co}^{2+}$  και  $\text{Mn}^{2+}$  σε θερμοκρασία δωματίου με ανταλλαγή ιόντων. Η ικανότητα προσρόφησης για την απομάκρυνση αυτών των μετάλλων αυξήθηκε με τη θερμοκρασία και η σειρά εκλεκτικότητας του  $\text{NH}_4$ -κλινοπιτολίτη ήταν  $\text{Mn} > \text{Co} > \text{Ni}$ . Αυτή η συμπεριφορά εξαρτάται από τη διαφορετική αλληλεπίδραση των κατιόντων με τις θέσεις σύνδεσης τόσο σε διάλυμα όσο και σε πλαίσιο ζεόλιθου, και από την προσβασιμότητα σε τοποθεσίες ανταλλαγής ιόντων εντός του κλινοπιτόλιθου (Rodríguez-Iznaga et al., 2018).

Οι ζεόλιθοι έχουν τροποποιηθεί με μέταλλα όπως το μαγγάνιο που είναι τοξικά. Δυστυχώς, στις περισσότερες μελέτες, δεν έγιναν μετρήσεις αυτών των μετάλλων στο επεξεργασμένο νερό. Αν αυτά τα μέταλλα λιπάνονται, τότε τα προσροφητικά είναι άχρηστα. Τα  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  και  $\text{Pb}^{2+}$  απομακρύνθηκαν από υδατικά διαλύματα με τη χρήση ενός τροποποιημένου μαγγανίου. Η αρχική συγκέντρωση μετάλλων, το pH, ο χρόνος επαφής και η θερμοκρασία ήταν οι παράμετροι που εξετάστηκαν. Οι διαδικασίες προσρόφησης ήταν ενδοθερμικές (Lu et al., 2017).

Οι Olguín et al. (1999) διερεύνησαν την επίδραση του ουρανίου στην προσρόφηση από το ζεόλιθο, χρησιμοποιώντας το εξασθενές ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) και το τετρασθενές ουράνιο ( $\text{U}^{4+}$ ). Χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα της ίδιας συγκέντρωσης (0,05N) και των δύο χημικών ειδών και στις ίδιες πειραματικές συνθήκες, οι μέγιστες τιμές πρόσληψης ήταν 1,86 και 2,86 meq / g για  $\text{U}^{+6}$  και  $\text{U}^{+4}$ , αντίστοιχα. Οι διεργασίες προσρόφησης εξαρτήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τη συγκέντρωση ουρανίου επειδή καθορίζει το pH του διαλύματος και τα όξινα μέσα προκαλούν απώλεια κρυσταλλικότητας του ζεόλιθου. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν ακόμη πιο γνωστό για το U (IV) από το U (VI). Και τα δύο είδη ουρανίου καταλαμβάνουν κατιονικές θέσεις στη ζεολιθική δομή με διαδικασίες διάχυσης (Olguín et al., 1999).



Η προσρόφηση του ουρανίου έχει επίσης μελετηθεί χρησιμοποιώντας μερικούς τροποποιημένους (φυσικούς και συνθετικούς) ζεόλιθους. Οι Akyil et al. (2003) χρησιμοποίησαν συνθετικά πολυακρυλονιτριλίου με ζεόλιθο X και φυσικό κλινοπτιλόλιθο και διαπίστωσαν ότι το προηγούμενο σύνθετο ήταν ένα καλύτερο προσροφητικό για τα ιόνια ουρανίου από το σύνθετο κλινοπτιλόλιθο και η ποσοτική εκρόφηση ήταν δύσκολη (Akyil et al., 2003). Επιπλέον, επιβεβαιώνουν τη σπάνια επίδραση της ταυτόχρονης παρουσίας  $\text{Th}^{+4}$  στην πρόσληψη ουρανίου. Οι Abdi et al. (2014) χρησιμοποίησαν ένα νανοσύνθετο  $\text{CuO}$  / ζεόλιθο X στο φυσικό pH του νερού της βρύσης. Το νανοσύνθετο ενίσχυσε την πρόσληψη ουρανίου του ζεόλιθου X, αλλά τα ανιόντα και τα κατιόντα του νερού της βρύσης ανταγωνίστηκαν το ουράνιο (Abdi et al., 2014). Μια διαδικασία προσρόφησης με τροποποιημένο φυσικό ζεόλιθο σε pH 5, πέτυχε μέγιστη ικανότητα προσρόφησης 2 mg / g (Bakatula et al., 2015).

Σε  $\text{pH} > 5$  τα ανιονικά είδη που σχηματίζονται δεν έχουν συγγένεια με το προσροφητικό μέσο. Επιπλέον, η παρουσία ανθρακικού, θεικού, ασβεστίου, μαγνησίου και στροντίου μείωσε την πρόσληψη ουρανίου. Θεωρείται ως εκ τούτου ότι η προσρόφηση του ουρανίου θα μπορούσε να είναι ένας συνδυασμός προσρόφησης και καθίζησης και ότι η διάχυση των σωματιδίων είναι το καθοριστικό βήμα της προσρόφησης. Ο φυσικός κλινοπτιλόλιθος που κατεργάστηκε με υδροχλωρικό (1M), οξαλικό (0,5M) ή κιτρικό (0,33M) οξύ υπέστη συσσωμάτωση και διάσπαση της δομής λόγω των επεξεργασιών, αυτά τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της πρόσληψης ουρανίου (Jiménez-Reyes et al., 2021). Η υψηλότερη πρόσληψη λήφθηκε με κατεργασμένο με  $\text{HCl}$  ζεόλιθο (9,22 mg / g σε pH 6). Δυστυχώς, δεν αναφέρθηκαν τιμές pH ισορροπίας, κάτι που μπορεί να βοηθήσει στην ολοκλήρωση της κατανόησης της διαδικασίας.

Οι διεργασίες προσρόφησης ουρανίου με φυσικούς, συνθετικούς και τροποποιημένους ζεόλιθους εξαρτώνται από την αρχική συγκέντρωση ουρανίου, το pH, την παρουσία άλλων κατιόντων (νάτριο, ασβέστιο) και ανιόντα (ανθρακικό, διττανθρακικό, θεικό) και θερμοκρασία. Η συγκέντρωση ουρανίου καθορίζει το pH και αυτή η παράμετρος καθορίζει με τη σειρά του το χημικό είδος. Εναλλακτικά, η οξύτητα προκαλεί συσσωμάτωση και απώλεια κρυσταλλικότητας των ζεολίθων. Κατά

συνέπεια, οι ιδιότητες προσρόφησής τους αλλάζουν. Άλλα κατιόντα που σχετίζονται με ζεόλιθους προσφέρουν έντονο ανταγωνισμό με το ουράνιο, ενώ ορισμένα ανιόντα σχηματίζουν αδιάλυτα χημικά είδη (Jiménez-Reyes et al., 2021).

---

## Κεφάλαιο 6°

### Συμπεράσματα

---

Συνοψίζοντας αξίζει να αναφερθεί ότι στα κινέζικα η λέξη «κρίση» αποτελείται από δύο ιδεογράμματα, όπου το ένα ιδεόγραμμα αντιπροσωπεύει τη λέξη κίνδυνος ενώ το άλλο ιδεόγραμμα αντιπροσωπεύει τη λέξη ευκαιρία. Η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από την πολύ μεγάλη ποσότητα ενέργειας που παράγεται από μια πολύ μικρή ποσότητα καυσίμου και η ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας είναι επίσης σχετικά μικρή. Ωστόσο, μεγάλο μέρος των παραγόμενων αποβλήτων είναι ραδιενεργό και ως εκ τούτου πρέπει να διαχειρίζεται προσεκτικά ως επικίνδυνο υλικό. Όλα τα μέρη του κύκλου πυρηνικών καυσίμων παράγουν κάποια ραδιενεργά απόβλητα και το κόστος διαχείρισης και απόρριψης αυτού είναι μέρος του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή, εσωτερικεύεται και πληρώνεται από τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας) (World Nuclear Association, 2018).

Συγκεκριμένα τα βασικά συμπερασματικά σημεία της παρούσας εργασίας είναι τα κάτωθι:

- Η κύρια μέθοδος διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων είναι η απομόνωση. Η απομόνωση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε εάν και όταν τα ραδιενεργά υπολείμματα τελικά επανεμφανιστούν στη βιόσφαιρα, θα είναι παρόντα σε συγκεντρώσεις αρκετά χαμηλές για να ικανοποιήσουν ορισμένα κριτήρια αποδοχής δόσης που βασίζονται στην υγεία.
- Η πυρηνική ενέργεια αναμένεται να αναπτυχθεί σε ρυθμιζόμενες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας με αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και αυξανόμενη ανάγκη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άνευ εκπομπών άνθρακα (IAEA & NEA-OECD, 2016).
- Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να ακολουθεί ορισμένες αρχές και συστήματα για να διασφαλίζει ότι τα πυρηνικά απόβλητα

αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής και διάθεσης (Salama et al., 2015).

- Βασικοί άξονες της διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων είναι:

(1) Προστασία της ανθρώπινης υγείας. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει πράγματι να προστατεύσει την ανθρώπινη υγεία σε αποδεκτό επίπεδο.

(2) Προστασία του περιβάλλοντος. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει πράγματι να προστατεύσει το περιβάλλον σε αποδεκτό επίπεδο.

(3) Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον κατά τη μεταφορά τους πέρα από τα εθνικά σύνορα.

(4) Προστασία των επόμενων γενεών. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να διασφαλίσει ότι οι κίνδυνοι για την υγεία που μπορεί να προκαλέσει στις μελλοντικές γενιές δεν αναμένεται να είναι μεγαλύτεροι από τα αποδεκτά επίπεδα.

(5) Ελαχιστοποίηση του βάρους για τις μελλοντικές γενιές. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να διασφαλίσει ότι η τρέχουσα επεξεργασία μπορεί να αντιμετωπιστεί αποφασιστικά, με όσο το δυνατόν λιγότερη περιττή επιβάρυνση για τις μελλοντικές γενιές.

(6) Δημιουργία νομικού πλαισίου. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να υποστηρίζεται από αντίστοιχο εθνικό αλλά και υπερεθνικό νομικό πλαίσιο.

(7) Έλεγχος της παραγωγής αποβλήτων. Η παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί εύλογα.

---

## Βιβλιογραφικές αναφορές

---

- *Wastewater treatment companies based on revenue globally 2017* | Statista. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from <https://www.statista.com/statistics/619496/leading-companies-in-the-global-nuclear-waste-market-by-revenue/>
- 1959-Antarctic-treaty.pdf*. (n.d.).
- Abdi, M. R., Shakur, H. R., Rezaee Ebrahim Saraee, K., & Sadeghi, M. (2014). Effective removal of uranium ions from drinking water using CuO/X zeolite based nanocomposites: Effects of nano concentration and cation exchange. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300(3), 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3092-3>
- Agency, I. E. (2019). World Energy Outlook 2019. In *SPE Journal* (Vol. 7, Issue 4, p. 346).
- Akyil, S., Aslani, M. A. A., & Eral, M. (2003). Sorption characteristics of uranium onto composite ion exchangers. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 256(1), 45–51. <https://doi.org/10.1023/A:1023391707606>
- Ali, O. I. M., Osman, H. H., Sayed, S. A., & Shalabi, M. E. H. (2011). The removal of some rare earth elements from their aqueous solutions on by-pass cement dust (BCD). *Journal of Hazardous Materials*, 195, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.014>
- Ambashta, R. D., & Sillanpää, M. E. T. (2012). Membrane purification in radioactive waste management: A short review. In *Journal of Environmental Radioactivity* (Vol. 105, pp. 76–84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.12.002>
- Annual reporting archive | Investors | Home*. (n.d.). Retrieved June 6, 2021, from <https://www.bp.com/en/global/corporate/investors/results-and-reporting/annual-report/annual-reporting-archive.html?fbclid=IwAR10MGPo0eRZUJe--iWeAtj>

- Arnold, B. W., Brady, P. V., Bauer, S. J., Herrick, C., Pye, S., & Finger, J. (2014). Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste. In *Deep Borehole Disposal of Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel* (pp. 135–179). <https://doi.org/10.2172/1029790>
- Assembly, G. (2010). 70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *International Journal of Marine and Coastal Law*, 25(2), 271–287.
- Assembly, U. G. (2014). *Prohibition of the dumping of radioactive wastes* (pp. 150–152). <https://doi.org/10.18356/b25887dc-en>
- Association, W. N. (2019). World Nuclear Performance Report. *World Nuclear Association*, 1–36. <https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-performance-report.aspx>
- Auerbach, S. M., Carrado, K. A., & Dutta, P. K. (2003). Handbook of Zeolite Science and Technology. In *Handbook of Zeolite Science and Technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203911167>
- Bacakova, L., Vandrovцова, M., Kopova, I., & Jirka, I. (2018). Applications of zeolites in biotechnology and medicine-a review. In *Biomaterials Science* (Vol. 6, Issue 5, pp. 974–989). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c8bm00028j>
- Bakatula, E. N., Mosai, A. K., & Tutu, H. (2015). Removal of uranium from aqueous solutions using ammonium-modified zeolite. *South African Journal of Chemistry*, 68, 165–171. <https://doi.org/10.17159/0379-4350/2015/v68a23>
- Balaguer, F. (2019). Les déchets nucléaires, ou les cailloux dans la chaussure de l'économie circulaire. *Droit et Ville*, N° 87(1), 227–247. <https://doi.org/10.3917/dv.087.0227>
- Baldwin, T., Chapman, N., & Neall, F. (2008). Geological Disposal Options for

High-Level Waste and Spent Fuel Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority. *Sciences-New York, January*.

*Becquerel (Bq)* | *NRC.gov*. (n.d.). Retrieved June 7, 2021, from <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/becquerel-bq.html>

Bergesen, H. O., Parmann, G., & Thommessen, O. B. (2019a). Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency (Assistance Convention). In *Yearbook of International Cooperation on Environment and Development 1998–99* (pp. 168–169). <https://doi.org/10.4324/9781315066547-46>

Bergesen, H. O., Parmann, G., & Thommessen, O. B. (2019b). Convention on Early Notification of a Nuclear Accident (Notification Convention). In *Yearbook of International Cooperation on Environment and Development 1998–99* (pp. 170–171). <https://doi.org/10.4324/9781315066547-47>

Bergmans, A., Elam, M., Kos, D., Polič, M., Simmons, P., Sundqvist, G., & Walls, J. (2008). *Wanting the unwanted: Effects of public and stakeholder involvement in the long-term management of radioactive waste and the siting of repository facilities (Final report CARL project)*. February, 68.

Beswick, A. J., Gibb, F. G. F., & Travis, K. P. (2014). Deep borehole disposal of nuclear waste: Engineering challenges. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, 167(2), 47–66. <https://doi.org/10.1680/ener.13.00016>

Birnie, P., Boyle, A., & Redgwell Catherine. (2009). *International law and the environment* (O. U. Press (Ed.); 3rd ed).

Cacuci, D. G. (2010). Handbook of Nuclear Engineering. In *Handbook of Nuclear Engineering*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9>

Chadwick, J. (1932). Possible existence of a neutron [1]. In *Nature* (Vol. 129, Issue 3252, p. 312). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/129312a0>

Choudhury, T., & Bhattacharyya, S. R. (2016). Nuclear Waste Management. In *International Journal of Pure and Applied Physics* (Vol. 12, Issue 1).

<http://www.ripublication.com>

- Clark, B. M., Tumurugoti, P., Sundaram, S. K., Amoroso, J. W., & Marra, J. C. (2021). Preparation and characterization of multiphase ceramic designer waste forms. *Scientific Reports*, *11*(1), 4512. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84014-1>
- Davisson, M. L., Hamilton, T. F., & Tompson, A. F. B. (2012). Radioactive waste buried beneath runit dome on enewetak atoll, marshall islands. *International Journal of Environment and Pollution*, *49*(3–4), 161–178. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2012.050897>
- de Kageneck, A., & Pinel, C. (1998). The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. *International and Comparative Law Quarterly*, *47*(2), 409–425. <https://doi.org/10.1017/s0020589300061911>
- Díaz Barrado, C. M. (2017). Los objetivos de desarrollo sostenible: un principio de naturaleza incierta y varias dimensiones fragmentadas. *Anuario Español de Derecho Internacional*, *32*, 9–48. <https://doi.org/10.15581/010.32.9-48>
- EU energy trends to 2030. (2009). *UPDATE 2009, EUROPEAN COMMISSION Directorate-General for Energy in collaboration with Climate Action DG and Mobility and Transport DG*. <https://doi.org/10.2833/21664>
- EUROPEAN COMMISSION. (2011). *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*.
- Fang, X. H., Fang, F., Lu, C. H., & Zheng, L. (2017). Removal of Cs<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, and Co<sup>2+</sup> Ions from the Mixture of Organics and Suspended Solids Aqueous Solutions by Zeolites. *Nuclear Engineering and Technology*, *49*(3), 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.11.008>
- Fermi, B. E., Amaldi, E., Asetti, F. R., & Segre, E. (1934). Artificial radioactivity produced by neutron bombardment. In *Nature* (Vol. 134, Issue 3391, p. 668). W



ertenstein. <https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0168>

Fischer, D. (n.d.). *INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY The First Forty Years*. <https://doi.org/10.01.2003>

Gavrilescu, M., Pavel, L. V., & Cretescu, I. (2009). Characterization and remediation of soils contaminated with uranium. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 163, Issues 2–3, pp. 475–510). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.103>

Graham, T. (n.d.). *COMPREHENSIVE NUCLEAR-TEST-BAN TREATY*. Retrieved April 17, 2021, from [www.un.org/law/avl](http://www.un.org/law/avl)

Guth, S., Gestwa, K., Penter, T., & Richers, J. (2019). Soviet nuclear technoscience: Topography of the field and new avenues of research. In *Cahiers du Monde Russe* (Vol. 60, Issue 2). Collège de France, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (E H E S S). <https://doi.org/10.4000/monderusse.11201>

*Hacia una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible*. (2018). [http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/SalaDePrensa/Multimedia/Publicaciones/Documents/PLAN DE ACCION PARA LA IMPLEMENTACION DE LA Agenda 2030.pdf](http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/SalaDePrensa/Multimedia/Publicaciones/Documents/PLAN_DE_ACCION_PARA_LA_IMPLEMENTACION_DE_LA_Agenda_2030.pdf)

Hedin, A. (1997). Spent nuclear fuel - how dangerous is it? A report from the project "Description of risk." *IAEA Technical Report 97-13, March, 70*. [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/29/015/29015601.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/015/29015601.pdf)

Hosan, M. I. (2018). Radioactive Waste Classification, Management and Environment. *Engineering International*, 5(2), 53. <https://doi.org/10.18034/ei.v5i2.1082>

Hou, X., & Roos, P. (2008). Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples. In *Analytica Chimica Acta* (Vol. 608, Issue 2, pp. 105–139). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.12.012>

- IAEA. (2009). *IAEA Safety Standards Classification of Radioactive Waste for protecting people and the environment No. GSG-1 General Safety Guide*. <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- IAEA, & NEA-OECD. (2016). *Uranium 2016: Resources, Production and Demand* NEA NUCLEAR ENERGY AGENCY. [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?fbclid=IwAR07CL2ij7UbUJPDkUVAVIiFeowyoHRTtUliHBhiGrsubcINSV9ifInjNk](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?fbclid=IwAR07CL2ij7UbUJPDkUVAVIiFeowyoHRTtUliHBhiGrsubcINSV9ifInjNk)
- Ialenti, V. (2021). Drum breach: Operational temporalities, error politics and WIPP's kitty litter nuclear waste accident. *Social Studies of Science*. <https://doi.org/10.1177/0306312720986609>
- Ibrahim, A. G., & Aladsani, F. (2016). Convex Sweeping Processes with Noncompact Perturbations and with Delay in Banach Spaces. *Abstract and Applied Analysis*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3853205>
- IMO. (2021). *London Convention (LDC,LC) and London Protocol (LP)*. IMO. <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/LDC-LC-LP.aspx>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2006). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. In *International Atomic Energy Agency* (Vol. 2). <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Chernobyl?s+Legacy:+Health,+Environmental+and+Socio-Economic+Impacts#0>
- International Convention for the Prevention of Pollution from Ships , 1973*  
*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships , 1973*. (1973).
- Jiménez-Reyes, M., Almazán-Sánchez, P. T., & Solache-Ríos, M. (2021). Radioactive waste treatments by using zeolites. A short review. In *Journal of Environmental*

*Radioactivity* (Vol. 233, p. 106610). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106610>

Jones, D. G. (2001). Measurement of Seafloor Radioactivity at the Farallon Islands Radioactive Waste Dump Site, California. In *Open-File Report*.  
<https://doi.org/10.3133/OFR0162>

King, S. D. (2007). *James Lovelock: Nuclear power is the only green solution*. 7–9.  
[https://www.independent.co.uk/voices/commentators/james-lovelock-nuclear-power-is-the-only-green-solution-564446.html?fbclid=IwAR1eFvdgN1B-INglJ6emByEglCHrIS6QYltDc\\_2rLHTZ7a2fv7SEOAGyuX4](https://www.independent.co.uk/voices/commentators/james-lovelock-nuclear-power-is-the-only-green-solution-564446.html?fbclid=IwAR1eFvdgN1B-INglJ6emByEglCHrIS6QYltDc_2rLHTZ7a2fv7SEOAGyuX4)

Koohsaryan, E., & Anbia, M. (2016). Nanosized and hierarchical zeolites: A short review. In *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis* (Vol. 37, Issue 4, pp. 447–467). Science Press. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61038-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61038-5)

Lee, T. R., Brown, J., Henderson, J., Mcdermid, C., & White, H. (1985). Nuclear waste management. *Nature*, 317(6038), 570. <https://doi.org/10.1038/317570a0>

Li, Y., Li, L., & Yu, J. (2017). Applications of Zeolites in Sustainable Chemistry. In *Chem* (Vol. 3, Issue 6, pp. 928–949). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.10.009>

Liu, J., & Dai, W. (2019). Overview of nuclear waste treatment and management. *E3S Web of Conferences*, 118. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911804037>

Lowenthal, M. (1997). *Radioactive-waste classification in the United States: history and current predicaments*.  
[http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:36034655](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:36034655)

Lu, X., Shi, D., & Chen, J. (2017). Sorption of Cu<sup>2+</sup> and Co<sup>2+</sup> using zeolite synthesized from coal gangue: isotherm and kinetic studies. *Environmental Earth Sciences*, 76(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6923-z>

Lunan, D. (1983). Nuclear waste disposal in space. *JBIS. Journal of the British Interplanetary Society*, 36(4), 147–152.

Massachusetts Institute of Technology. (2011). *ii MIT Study on The Future of*

*nuclear Fuel cycle.*

- Mattila, J., & Tammisto, E. (2012). Stress-controlled fluid flow in fractures at the site of a potential nuclear waste repository, Finland. *Geology*, 40(4), 299–302. <https://doi.org/10.1130/G32832.1>
- Morris, K., Law, G. T. W., & Bryan, N. D. (2011). *Chapter 6. Geodisposal of Higher Activity Wastes* (pp. 129–151). <https://doi.org/10.1039/9781849732888-00129>
- Nuclear Energy Agency (NEA) - *Radioactive waste management*. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_14364/radioactive-waste-in-perspective?fbclid=IwAR0p8hfTJqkg65X47X0zWuqXVy\\_FR4iVvkqMXOLaOn3WS2L3u-DysV-1Idl4](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_14364/radioactive-waste-in-perspective?fbclid=IwAR0p8hfTJqkg65X47X0zWuqXVy_FR4iVvkqMXOLaOn3WS2L3u-DysV-1Idl4)
- Nuclear Energy Agency (NEA) - *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*. (n.d.). Retrieved April 16, 2021, from [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?fbclid=IwAR07CL2ij7UbUJPDkUVAVIiFeowyoHRTtlUliHBhiGrsu6cINSV9ifInjNk](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_15080/uranium-2018-resources-production-and-demand?fbclid=IwAR07CL2ij7UbUJPDkUVAVIiFeowyoHRTtlUliHBhiGrsu6cINSV9ifInjNk)
- Olguín, M. T., Solache-Ríos, M., Acosta, D., Bosch, P., & Bulbulian, S. (1999). Uranium sorption in zeolite X: The valence effect. *Microporous and Mesoporous Materials*, 28(3), 377–385. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00306-0](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00306-0)
- Pátzay, G., Tilky, P., Schunk, J., Pintér, T., Feil, F., Hamaguchi, K., & Weiser, F. (2006). Radioactive wastewater treatment using a mixture of TANNIX sorbent and VARION mixed bed ion exchange resin. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, 2(4), 328–341. <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2006.011716>
- Philberth, K. (1977). The Disposal of Radioactive Waste in Ice Sheets. *Journal of Glaciology*, 19(81), 607–617. <https://doi.org/10.3189/s0022143000215517>
- Pichtel, J. (2014). Waste Management Practices. In *Waste Management Practices*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16576-7>

- Rhodes, R. (1988). Making Atomic. In *Simon & Schuster, Inc.*
- Rodríguez-Iznaga, I., Rodríguez-Fuentes, G., & Petranovskii, V. (2018). Ammonium modified natural clinoptilolite to remove manganese, cobalt and nickel ions from wastewater: Favorable conditions to the modification and selectivity to the cations. *Microporous and Mesoporous Materials*, 255, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.07.034>
- Rosson, R., Lahr, J., Garcia, R., Blackman, C., & Kahn, B. (2001). *RADIONUCLIDES IN SEDIMENT AT NUCLEAR FACILITIES IN GEORGIA*. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/44108>
- Salama, A., El Amin, M. F., & Sun, S. (2015). Numerical investigation of high level nuclear waste disposal in deep anisotropic geologic repositories. *Progress in Nuclear Energy*, 85, 747–755. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.09.004>
- Schneider, M., Froggatt, A., Hazemann, J., Katsuta, T., Lovins, A. B., Ramana, M. V., Hirschhausen, C. v., & Wealer, B. (2016). *The World Nuclear Industry Status Report 2019*. July, 1–38. <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20160713MycaleSchneider-WNISR-2016-FCCJ-Tokyo.pdf>
- Shaver, R. (1995). INTERNATIONAL LAW AND THE ENVIRONMENT. *Electronic Green Journal*, 1(3). <https://doi.org/10.5070/g31310209>
- Skutnik, S. E., & Ph, D. (2014). *Nuclear fuel cycle Uranium resources*.
- Sun, Y., Li, J., & Wang, X. (2014). The retention of uranium and europium onto sepiolite investigated by macroscopic, spectroscopic and modeling techniques. In *Geochimica et Cosmochimica Acta* (Vol. 140, pp. 621–643). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.06.001>
- The Antarctic Treaty | NSF - National Science Foundation*. (n.d.). Retrieved September 17, 2021, from <https://www.nsf.gov/geo/opp/antarct/anttrty.jsp>
- The Basel Convention. (2011). *Basel Convention > The Convention > Overview*. <http://www.basel.int/TheConvention/Overview/tabid/1271/Default.aspx?fbclid=I>

wAR2NRyUeWfR7Mi5tnIwdq2dmVt76OlfZeyrL0HCe0pWDAs5lpE1BYep0Q  
P0

U.S. Department of Energy. (2020). *U.S. Department of Energy's Waste Isolation Pilot Plant - Home Page*. <https://www.wipp.energy.gov/>

Union of Soviet Socialist Republics, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, the United States of America, France–Austria. (1955). *American Journal of International Law*, 49(S4), 162–194. <https://doi.org/10.2307/2213854>

UNITED NATIONS. GENERAL ASSEMBLY. (2000). United Nations Millennium Declaration - A/RES/55/2. *General Assembly, 18 September*.

USNRC. (2013). Dry Cask Storage of Spent Nuclear Fuel. *Usnrc*, 2. <http://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/faqs.html>.

Veracka, T., & Bailey, J. (2000). Resource conservation and recovery act. In *Environmental Compliance: A Web-Enhanced Resource* (pp. 2-1-2–20). <https://doi.org/10.4135/9781452218526.n283>

Vovk, I. (n.d.). *Regional Seminar on Approaches and Practices in Strengthening Radiation Protection and Waste Management Infrastructure in Countries of Eastern Europe and the Former USSR, IAEA PROGRAMME FOR RADIOACTIVE WASTE SAFETY STANDARDS*.

Warf, B. (2014). United Nations Conference on Environment and Development. In *Encyclopedia of Geography*. <https://doi.org/10.4135/9781412939591.n1173>

World Economic Forum. (2019). A New Circular Vision for Electronics Time for a Global Reboot. In *World Economic Forum* (Issue January). [www.weforum.org](http://www.weforum.org)

World Nuclear Association. (2018). *Radioactive Waste Management | Nuclear Waste Disposal - World Nuclear Association*. World Nuclear Association. [https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx?fbclid=IwAR1ojzsD39JVSBF1PBJX9BqUT1asWpR1YamkpId\\_\\_A-KEBRcXKhJmYp1hxQ](https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx?fbclid=IwAR1ojzsD39JVSBF1PBJX9BqUT1asWpR1YamkpId__A-KEBRcXKhJmYp1hxQ)

*World Nuclear Waste Report*. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from

<https://worldnuclearwastereport.org/>

Yeritsyan, H. N., Sahakyan, A. A., Harutunyan, V. V., Nikoghosyan, S. K., Hakhverdyan, E. A., & Grigoryan, N. E. (2007). Natural zeolites and application in liquid waste treatment. *NATO Security through Science Series B: Physics and Biophysics*, 395–401. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5724-3\\_38](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5724-3_38)

Zhu, Y. G., & Shaw, G. (2000). Soil contamination with radionuclides and potential remediation. *Chemosphere*, 41(1–2), 121–128. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00398-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00398-7)

Προεδρικό Διάταγμα 91 (ΦΕΚ Α 130/01.09.2017), Νομοθετικό, ρυθμιστικό και οργανωτικό πλαίσιο για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων και τροποποίηση του π.δ. 122/2013