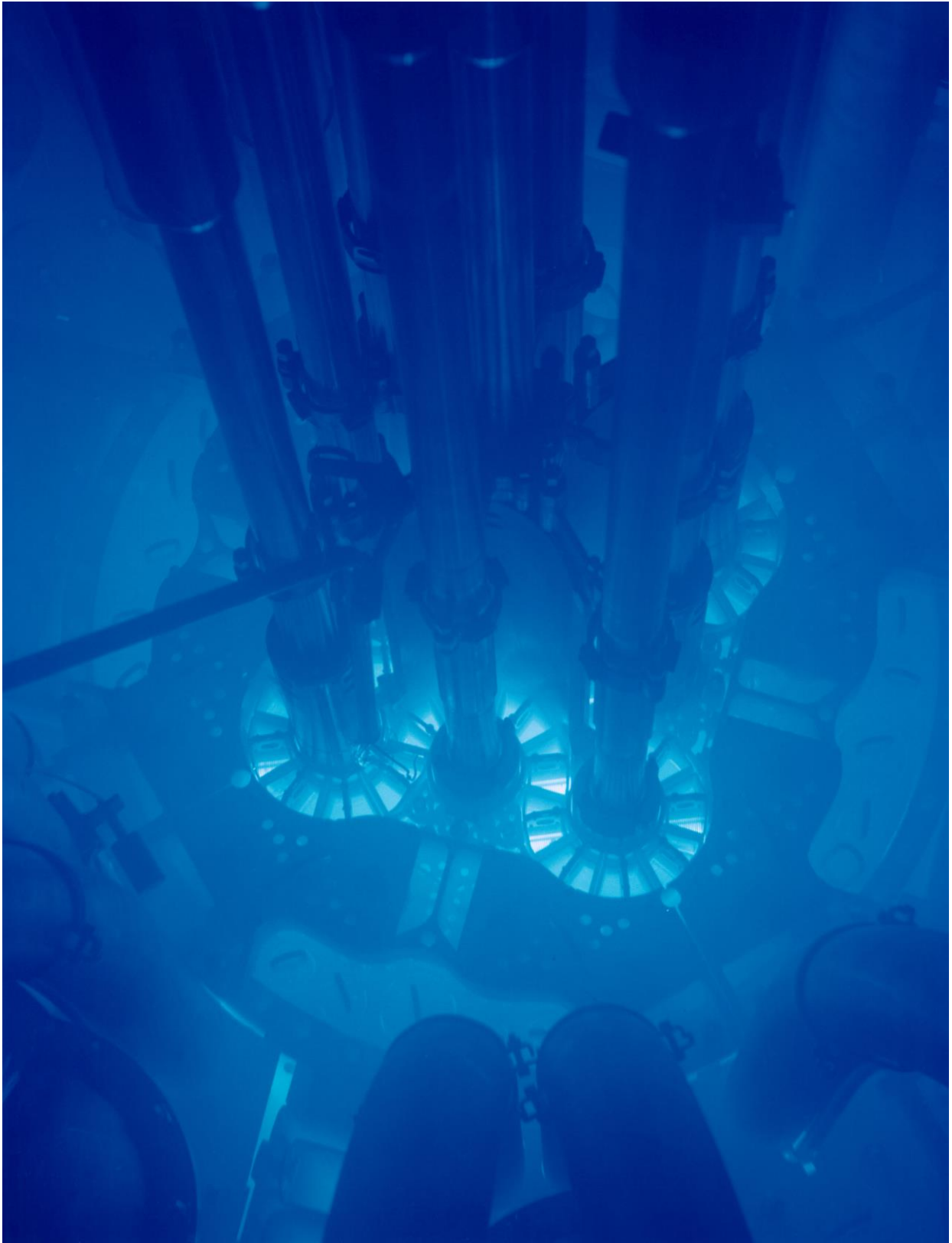


ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Πυρηνικά Απόβλητα



Εικόνα 1.1.1: Εσωτερικό Πυρηνικού Αντιδραστήρα ATR (Advanced Test Reactor) στο Idaho των Η.Π.Α. Η μπλε λάμψη είναι γνωστή ως ραδιενέργεια Cherenkov.

1.1 Γενικά Στοιχεία

Ραδιενεργά απόβλητα ονομάζονται τα απόβλητα που περιέχουν ποσότητες ραδιενεργών υλικών. Τα απόβλητα αυτά είναι συνήθως παραπροϊόντα της πυρηνικής σχάσης και της πυρηνικής τεχνολογίας γενικότερα, όπως η πυρηνική ιατρική. Είναι βλαβερά για τις περισσότερες μορφές ζωής και για το περιβάλλον και η χρήση τους ρυθμίζεται συνήθως από τις κυβερνήσεις ώστε να προστατεύεται η ανθρώπινη υγεία και φυσικά το περιβάλλον.

Όλα τα ραδιοϊσότοπα (ραδιενεργά ισότοπα) χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό που δείχνει σε πόσο χρόνο «χάνουν» τη μισή ραδιενέργειά τους, την *ημιζωή*. Τελικά, όλα τα ραδιενεργά υλικά κάποτε καταλήγουν να γίνουν σταθερά ισότοπα που δεν εκπέμπουν πλέον καμία ραδιενέργεια. Στην πραγματικότητα, βέβαια, τα πράγματα είναι πολύ πιο σύνθετα: πολλά ραδιοϊσότοπα δεν διασπώνται άμεσα σε σταθερά ισότοπα, αλλά σε άλλα ραδιοϊσότοπα ενός διαφορετικού χημικού στοιχείου, σχηματίζοντας έτσι μία «αλυσίδα διάσπασης» (decay chain) προτού καταλήξουν σε κάποια σταθερή μορφή.

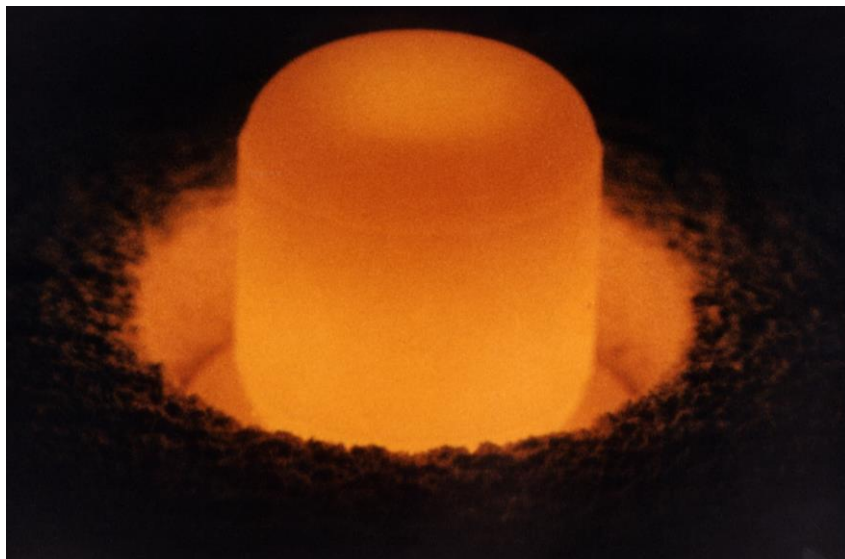
Κάθε ραδιενεργός πυρήνας ενός ατόμου ενός χημικού στοιχείου χαρακτηρίζεται ως ραδιονουκλίδιο. Η ραδιενέργεια των ραδιονουκλιδίων μειώνεται με το χρόνο, οπότε τα απόβλητα αρκεί να απομονωθούν και να εγκλειστούν σε κατάλληλες εγκαταστάσεις για χρονικό διάστημα, τέτοιο ώστε στο τέλος να μην αποτελούν πλέον κίνδυνο. Ο χρόνος για τον οποίο πρέπει να αποθηκευτούν ποικίλλει και εξαρτάται από το είδος του ραδιονουκλιδίου και τη φύση των ισοτόπων στα οποία διασπάται με την πάροδο του χρόνου.

Η ενέργεια και η μορφή της ιονίζουσας ακτινοβολίας που εκπέμπει μία ραδιενεργός ουσία είναι δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες για τον καθορισμό της επίπτωσης της στην υγεία τόσο του ανθρώπου όσο και των ζώων. Οι χημικές ιδιότητες της ουσίας θα καθορίσουν την πιθανότητα εξάπλωσης της ουσίας στο περιβάλλον και συνεπώς, μόλυνσης της ζωής.

Ένα ραδιονουκλίδιο μπορεί να εκπέμπει σωματίδια α (πυρήνες ηλίου ${}^4\text{He}$ με 2 νετρόνια και 2 πρωτόνια), σωματίδια β (β^- : ηλεκτρόνια ή β^+ : ποζιτρόνια) και ακτίνες γ (φωτόνια).

Τα ραδιενεργά απόβλητα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 1) Κατάλοιπα Ουρανίου (*Uranium Tailings*): Είναι παραπροϊόντα της εξόρυξης ουρανίου από τα ορυχεία. Συγκεκριμένα, κατά την εξόρυξη ουρανίου το πέτρωμα που λαμβάνεται συνθλίβεται και μετά απομακρύνονται τα αξιοποιήσιμα μεταλλεύματα που περιέχουν ουράνιο, ενώ τα υπόλοιπα είναι τα κατάλοιπα ουρανίου. Συνήθως περιέχουν πολώνιο-210, ραδόνιο-222, ράδιο-226, θόριο-230 και κάποια βαριά μέταλλα, όπως μόλυβδο και αρσενικό.
- 2) Κατάλοιπα Χαμηλού Επιπέδου (*LLW*): Προέρχονται κυρίως από τα νοσοκομεία, τις βιομηχανίες και σε μικρότερο ποσοστό από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Περιλαμβάνουν ρούχα, εργαλεία, φίλτρα και άλλα υλικά με μικρή εκπεμπόμενη ραδιενέργεια.
- 3) Κατάλοιπα Μεσαίου Επιπέδου (*ILW*): Περιλαμβάνουν μεταλλικές επενδύσεις πυρηνικών καυσίμων, υλικά που μολύνθηκαν κατά τον παροπλισμό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα και απόβλητα με μέτριο ποσοστό ραδιενέργειας.
- 4) Κατάλοιπα Υψηλού Επιπέδου (*HLW*): Είναι τα άμεσα προϊόντα της πυρηνικής σχάσης στους αντιδραστήρες. Έχουν υψηλά ποσοστά ραδιενέργειας και είναι συνήθως θερμά.
- 5) Υπερουράνια Κατάλοιπα (*TRUW*): Η διάκριση αυτή υπάρχει μόνο στις Η.Π.Α. και είναι υλικά μολυσμένα με στοιχεία που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του ουρανίου και εκπέμπουν α-σωματίδια με ημιζωή μεγαλύτερη από 20 χρόνια.



Εικόνα 1.2.1: Κύλινδρος από Διοξείδιο του Πλουτονίου ($^{238}\text{PuO}_2$).

1.2 Πηγές Ραδιενεργών Αποβλήτων

Τα ραδιενεργά απόβλητα προέρχονται κυρίως από τις ακόλουθες ανθρώπινες δραστηριότητες:

- 1) Κύκλος πυρηνικού καυσίμου (στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και τα πυρηνικά υποβρύχια): Από τα ορυχεία όπου λαμβάνεται το μέταλλευμα που περιέχει yellowcake (U_3O_8) παράγονται οι ουρές ουρανίου. Στη συνέχεια μετατρέπεται σε διοξείδιο του ουρανίου (UO_2) και ύστερα σε αέριο εξαφθοριούχο ουράνιο (UF_6), οπότε και εμπλουτίζεται εύκολα. Τελικά, ξαναμετατρέπεται σε εμπλουτισμένο καύσιμο UO_2 , έτοιμο για τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Μετά από την πυρηνική σχάση και όποια ανακύκλωση και ανατροφοδότηση καυσίμου απομένουν ραδιονουκλίδια ουρανίου-234, νεπτουνίου-237, πλουτωνίου-238, αμερικίου-241 και καλιφορνίου. Αυτά είναι κατάλοιπα υψηλού επιπέδου (HLW) και πολύ επικίνδυνα, λόγω της ραδιενέργειάς τους αλλά και επειδή μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε υλικά πυρηνικών όπλων.
- 2) Αφοπλισμός πυρηνικών όπλων: Τα πυρηνικά όπλα περιέχουν αμερίκιο, τρίτιο, πλουτώνιο, πολώνιο και φυσικά ουράνιο. Είναι εξίσου ραδιενεργά με τα απόβλητα από έναν πυρηνικό αντιδραστήρα.
- 3) Πυρηνική Ιατρική: Σε διαγνώσεις αλλά και θεραπείες χρησιμοποιούνται τεχνητό-99m, ύτριο-90, ιώδιο-131, στρόντιο-89, ιρίδιο-192, κοβάλτιο-60 και καίσιο-137.
- 4) Βιομηχανία: Ραδιενεργά ισότοπα με σχετικά μικρή ημιζωή χρησιμοποιούνται για την ανεύρεση πηγών πετρελαίου και για ραδιογραφίες.

1.3 Αποθήκευση και Χειρισμός Πυρηνικών Αποβλήτων

Τα παραπάνω αναλυθέντα πυρηνικά απόβλητα μπορούν να αποβούν επιζήμια για την υγεία μας και για το περιβάλλον, εάν δεν αποθηκευτούν σωστά. Η αποθήκευση και η ανακύκλωση των πυρηνικών καυσίμων που αρχίζει να αναπτύσσεται είναι οι μόνες εφαρμόσιμες λύσεις μέχρι σήμερα για τα απόβλητα αυτού του τύπου, αν και σε πειραματικό κυρίως στάδιο εφαρμόζονται και άλλες διαδικασίες χειρισμού των αποβλήτων. Οι κυριότεροι τρόποι αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων είναι:

- Απόρριψη στο διάστημα
- Ταφή στο έδαφος
- Απόρριψη στους ωκεανούς
- Αποθήκευση σε θραύσματα πάγων (κυρίως στην Ανταρκτική)
- Αποθήκευση σε δοχεία (*containers*) πάνω από το έδαφος



Εικόνα 1.3.1: Δοχείο που περιέχει πυρηνικά απόβλητα, Πολιτεία της Νεβάδα, Η.Π.Α.

Βέβαια, τα πυρηνικά απόβλητα, προτού αποθηκευτούν, πρέπει να υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να μην αντιδρούν με άλλα χημικά στοιχεία και να αδρανοποιηθούν όσο περισσότερο γίνεται. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι επεξεργασίας με τους κυριότερους να είναι:

- 1) Υαλοποίηση (*Vitrification*): Τα απόβλητα αναμειγνύονται με κοινή ζάχαρη και στη συνέχεια υποβάλλονται σε πύρωση μέσω ενός θερμού, περιστρεφόμενου κυλίνδρου, ώστε να εξατμιστεί το νερό και να σταθεροποιηθεί το παραγόμενο μείγμα. Ύστερα, προστίθενται

θραύσματα κοινού γυαλιού και το μείγμα περιχύνεται σε τεράστια κυλινδρικά δοχεία από ανοξείδωτο ατσάλι. Έτσι, όταν το μείγμα κρυώσει, θα βρίσκεται σε μία ιδιαίτερα αδρανή φάση όπου το γυαλί (*borosilicate glass*) θα εμποδίζει τα όποια μόρια νερού να αντιδράσουν με τα πυρηνικά. Τέλος, τα δοχεία αυτά τοποθετούνται μέσα σε άλλα δοχεία που περιβάλλονται από υλικά που εμποδίζουν τη ραδιενέργεια (συνηθέστερα μόλυβδο), τα οποία πληρώνονται με αδρανή αέρια, πλένονται με νερό, σφραγίζονται και είναι πλέον έτοιμα για αποθήκευση.

- 2) Ανταλλαγή Ιόντων (*Ion Exchange*): Χρησιμοποιείται υδροξείδιο του σιδήρου (III) ($Fe(OH)_3$) για να αφαιρεθούν τα ραδιενεργά μέταλλα από τα υδατικά διαλύματά τους. Αφότου τα ραδιοϊσότοπα απορροφηθούν στο υδροξείδιο, το μείγμα περιχύνεται στα δοχεία και προστίθεται τσιμέντο, για να ακινητοποιηθεί το μείγμα.
- 3) Αυστραλιανό Synroc: Οι ακτινίδες, το στρόντιο, το βάριο και το κάισιο απορροφώνται από ένα μείγμα που περιέχει ολλανδίτη (*hollandite*, $BaAl_2Ti_6O_{16}$), ζirkονολίτη (*zirconolite*, $CaZrTi_2O_7$) και υπεροβσκίτη (*perovskite*, $CaTiO_3$).

Παρ' όλ' αυτά, στην αρχή αναφέραμε ότι υπάρχουν μέθοδοι για να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα τα πυρηνικά απόβλητα σε πειραματικό στάδιο. Για παράδειγμα, αναπτύσσεται η διαδικασία μεταστοιχείωσης (*nuclear transmutation*) των πυρηνικών αποβλήτων σε άλλα, λιγότερο ραδιενεργά με ειδικούς αντιδραστήρες (*Integral Fast Reactor*, *Myrrha*). Ήδη βρίσκεται σε εξέλιξη το ερευνητικό πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης "ACTINET" που διερευνά αυτή την εκδοχή.

Τέλος, υπό ανάπτυξη βρίσκεται και η τεχνική της ανακύκλωσης των πυρηνικών καυσίμων και της εύρεσης εφαρμογών τους στη βιομηχανία. Συγκεκριμένα, ένας τύπος αντιδραστήρα, οι αντιδραστήρες αναπαραγωγής (*Breeder reactors*), μπορούν να χρησιμοποιήσουν υπερουράνια στοιχεία για τη λειτουργία τους.

Βιβλιογραφία

- Modern medium to high level transport container for nuclear waste.* (2010, Μάρτιος 5). Ανάκτηση από Wikipedia, the free encyclopedia:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Nuclear_waste_container_2010_nevada.jpg
- Nuclear Fuel.* (2014, Δεκέμβριος 21). Ανάκτηση από Wikipedia, the free encyclopedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel
- Plutonium.* (2014, Δεκέμβριος 21). Ανάκτηση από Wikipedia, the free encyclopedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium>
- Radioactive Waste.* (2014, Δεκέμβριος 21). Ανάκτηση από Wikipedia, the free encyclopedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_waste
- Γεωργακάκος, Π., Σκαλωμένος, Α., Σφαρνάς, Ν., & Χριστακόπουλος, Ι. (2011, Ιούλιος 20). *Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' Τάξης Γενικού Λυκείου.* Ανάκτηση από Διαδραστικά Σχολικά Βιβλία: <http://ebooks.edu.gr/courses/DSGL-C107/document/4c77c3b14u4n/4e6e3f554q2p/4e6ef483o3ab.pdf>
- Σουμάκης, Ν. (2008, Μάρτιος 14). *ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΡΑΔΙΟΕΝΕΡΓΗ ΡΥΠΑΝΣΗ: ΔΕΛΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.* Ανάκτηση από Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών:
<http://estia.hua.gr:8080/dspace/bitstream/123456789/650/1/soumakhs.pdf>
- Σταυριανουδάκη, Ε. (2007, Νοέμβριος 14). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΑΠΕΙΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΑ ΒΑΛΚΑΝΙΑ.* Ανάκτηση από Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών:
<http://estia.hua.gr:8080/dspace/bitstream/123456789/248/1/Metaptychiaki22.pdf>
- Τζωρτζάκης, Α. (2012, Οκτώβριος 13). *Πρόβλεψη Ανακύκλωσης Απορριμμάτων με τη χρήση Εύκαμπτης Πληροφορικής.* Ανάκτηση από Technical University of Crete, Library: <http://poseidon.library.tuc.gr/artemis/MT2013-0018/MT2013-0018.pdf>