

ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας ισχύος, μεγάλος ή μικρός δεν είναι μια αυτόνομη μονάδα, αλλά για την λειτουργία του προαπαιτούνται βοηθητικές μονάδες, οι οποίες και κινδύνους ενέχουν και συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών στοιχείων. Αυτές, φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα του Πυρηνικού Κύκλου Καυσίμου. Τα πυρηνικά απόβλητα παράγονται σε διάφορα σημεία του κύκλου ενός πυρηνικού δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Δηλαδή, στην εξόρυξη του ουρανίου, στον καθαρισμό, στην μονάδα εμπλουτισμού του, στη συσκευασία καυσίμου, στον αντιδραστήρα, στην επεξεργασία και ανακύκλωση του καυσίμου και στην τελική φύλαξη των αποβλήτων. Πυρηνικά απόβλητα είναι και ο πυρηνικός αντιδραστήρας ολόκληρος αφού περάσει το χρόνο ζωής του (40 περίπου χρόνια), λόγω της υψηλής ραδιενέργειας που εκπέμπει στο εξής (φαινόμενο νετρονικής ενεργοποίησης). Θα πρέπει να διαλυθεί και να οδηγηθεί στο δρόμο των πυρηνικών αποβλήτων. Πυρηνικά απόβλητα, συσσωρεύονται και στις εγκαταστάσεις παραγωγής πυρηνικών όπλων σαν παραπροϊόν.

Τα πυρηνικά απόβλητα, ανάλογα με το βαθμό ραδιενέργειας, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες.

Τα απόβλητα υψηλής στάθμης, που αποτελούνται από τα παράγωγα του καυσίμου που καταναλώνεται στους αντιδραστήρες και από κάθε απόβλητο που δημιουργείται στο στάδιο της επανεπεξεργασίας του καυσίμου, από το οποίο ανακτάται το παραχθέν πλουτώνιο.

Τα υπέρ-ουράνια απόβλητα, που

αποτελούνται κυρίως από τα ισότοπα του πλουτωνίου με ενεργότητες μεγαλύτερες από 10 Ci/γραμμ. Αυτά, δημιουργούνται στην επανεπεξεργασία του καυσίμου, στην κατασκευή ράβδων καυσίμου πλουτωνίου και στην κατασκευή πυρηνικών όπλων (1 Ci/gr αντιστοιχεί σε $3,7 \times 10^{10}$ διασπάσεις/sec).

Τα απόβλητα χαμηλής στάθμης, που περιέχουν υπέρ-ουράνια στοιχεία με ενεργότητες κάτω από 10 Ci/gr. Αυτά, χρειάζονται μικρή σχετικά θωράκιση, αλλά δεν είναι και ακίνδυνα.

Τέλος, τα παράγωγα από την εξόρυξη και επεξεργασία του ουρανίου, που είναι τα κατάλοιπα με μικρές ποσότητες ραδιενεργών στοιχείων. Όπως είναι φυσικό, η ποσότητα της ραδιενέργειας που εκπέμπουν τα απόβλητα, δεν εξαρτάται μόνον από την ποσότητα των ραδιενεργών στοιχείων που περιέχονται αλλά και από το χρόνο μισής ζωής τους που μπορεί να φθάσει και τα 24.000 χρόνια. Οι μερικές εκατοντάδες από αυτά τα ραδιενεργά στοιχεία έχουν σχετικά μικρούς χρόνους μισής ζωής. Πέντε από αυτά έχουν χρόνους μεταξύ 1 και 5 χρόνια. Δύο, το στρόντιο-90 και το καίσιο-137, έχουν περίπου 30 και τρία, το ζirkόνιο-93, το ιώδιο-129 και το καίσιο-135 πάνω από 1 εκατομμύριο. Το πλουτώνιο-239 έχει χρόνο μισής ζωής 24000 χρόνια.

Η μεγαλύτερη εκπομπή ραδιενεργών στοιχείων γίνεται στη φάση της αντικατάστασης του παλαιού με καινούργιο καύσιμο. Η διαδικασία αυτή συνήθως γίνεται σταδιακά, ώστε να μη χρειαστεί να κλείσει ο αντιδραστήρας εφ' όσον το επιτρέπει ο τύπος του. Ένα φρέσκο στοιχείο καυσίμου εκπέμπει χαμηλές τιμές ραδιενέργειας, γιατί δεν έ-

χει ακόμη υποστεί σχάσεις. Αντίθετα, όταν το στοιχείο-καύσιμο που έχει καταναλωθεί, εξαχθεί από τον καρδιά του αντιδραστήρα, είναι έντονα ραδιενεργό και επικίνδυνο. Πριν μεταφερθεί στις εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας παραμένει για μεγάλο σχετικά χρονικό διάστημα μέσα σε δεξαμενές ώστε να μειωθεί η ενεργότητά του. Ένας αντιδραστήρας ελαφρού νερού ισχύος 1000 MW, παράγει εκατό κυβικά μέτρα το χρόνο στερεά απόβλητα υψηλής και χαμηλής στάθμης. Μετά από επεξεργασία τα απόβλητα αυτά, εγκλείονται σε μεταλλικά δοχεία και στη συνέχεια θάβονται. Το στοιχείο που παρουσιάζει τα μεγαλύτερα προβλήματα και λόγω της ποσότητάς του και λόγω του μεγάλου χρόνου μισής ζωής, είναι το πλουτώνιο. Αυτό, με χρόνο μισής ζωής 24000 χρόνια, διασπώμενο ακτινοβολεί. Και το πρόβλημα δεν είναι η αποθήκευση του μόνον, αλλά και η μεταφορά του από τους αντιδραστήρες αναμόρφωσης, όπου ανακτάται, μέχρι τους πυρηνικούς αντιδραστήρες όπου τελικά θα χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο. Το πλουτώνιο σαν χημικό στοιχείο είναι επί πλέον έντονα τοξικό και αρκούν ελάχιστες ποσότητες εισπνοής του για να προκαλέσουν το θάνατο.

Για τη φύλαξη του πλουτωνίου, προτείνονται διάφορες λύσεις, όπως ο διαχωρισμός του και η μεταφορά του σε κινητές δεξαμενές κατασκευασμένες από μπετόν, χάλυβα ή γυαλί και η αποστολή του σε ορυχεία. Το γυαλί όμως σε εκατό χρόνια γίνεται πορώδες και τυχόν διαρροές νερού στο χώρο φύλαξής του μπορεί να προκαλέσει απελευθέρωσή του.

Την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει

καταγγελίες πως ποσότητες πυρηνικών αποβλήτων βυθίζονται παράνομα στη θάλασσα, σαν προσωρινή λύση απαλλαγής τους και αποφυγής των υψηλών εξόδων επεξεργασίας και φύλαξής τους.

Προτάσεις, όπως αποστολή τους στο διάστημα, εκτός του ότι οικονομικά είναι υπερβολικά δαπανηρές, δεν παρέχουν καμιά ασφάλεια κατά τη διάρκεια της εκτόξευσής τους μέχρι ν' απομακρυνθούν από το πεδίο βαρύτητας της γης. Παράδειγμα ατυχήματος ήταν η έκρηξη του Challenger (28.1.1986) 70 δευτερόλεπτα μετά την εκτόξευσή του με αποτέλεσμα τον ακαριαίο θάνατο των επτά μελών του πληρώματος.

Ακόμη κι' αν βρεθεί ένας ασφαλής τρόπος φύλαξης των πυρηνικών αποβλήτων, το κόστος θα ήταν τόσο μεγάλο, που αν συνυπολογίζονταν στο κόστος λειτουργίας των αντιδραστήρων, δε θα συνέφερε πια η χρήση τους. Ακόμη και η εταιρία ηλεκτρικής ισχύος του Αμβούργου, που ελέγχει το κύκλωμα των γερμανικών πυρηνικών εργοστασίων, αναφέρει σ' ένα φυλλάδιό της, πως ενώ τα χαμηλής στάθμης απόβλητα ήδη από το 1978 αποθηκεύονται μέσα στη γη, για τα υψηλής στάθμης, η λύση δεν έχει βρεθεί ακόμη.

Τα πυρηνικά απόβλητα δεν έχουν πηγή μόνο τα ίδια τα πυρηνικά εργοστάσια και το καμένο τους καύσιμο, αλλά συσσωρεύονται ήδη από τη φάση της εξόρυξης του ουρανίου, του εμπλουτισμού του, της συσκευασίας σε ράβδους καύσιμου και της επεξεργασίας των αποβλήτων του εργοστασίου σε ειδικές μονάδες. Αυτές οι μονάδες αποτελούν τη μεγαλύτερη αποθήκη συγκέντρωσης ραδιενεργών υλικών από οποιαδήποτε άλλη πυρηνική δραστηριότητα στον

κόσμο. Μόνο κατά τη διάρκεια παραμονής τους στα πυρηνικά εργοστάσια πριν οδηγηθούν στις μονάδες αυτές, μπορούν να προκαλέσουν όχι μόνο διαρροές (σαν αυτή στη μονάδα του βουλγάρικου εργοστασίου στο Κοζλοντούι), αλλά κάτω από ορισμένες συνθήκες ακόμα και πυρηνικές εκρήξεις (περίπτωση Fukushima).

Μόνο στην πρώην Δυτική Γερμανία το 1990 τα απόβλητα αυτά ήσαν γύρω στις εκατό χιλιάδες τόνοι. Μεγάλα ποσά του καμένου καυσίμου μεταφέρονται από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες στις μονάδες επεξεργασίας. Επειδή υπάρχουν λίγες τέτοιες μονάδες θα πρέπει το ραδιενεργό αυτό απόβλητο να διανύσει τεράστιες αποστάσεις μέχρις ότου καταλήξει σ' αυτές είτε οδικά, είτε με πλοίο. Ένα ατύχημα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του θα είχε σαν αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ραδιενέργειας στην επιφάνεια της γης χωρίς καμιά δυνατότητα δέσμευσής της.

Δεν είναι τυχαίο πως οι μεγάλες εταιρείες κατασκευής αντιδραστήρων και εκμετάλλευσης του ουράνιου και του πλουτωνίου δεν είναι άσχετες με τις εταιρείες εκμετάλλευσης των συμβατικών καυσίμων. Η εξάρτηση των μικρών κυρίως κρατών από αυτές είναι προφανής. Όπως είναι προφανής και ο λόγος για τον οποίο η ηλιακή ενέργεια δεν αναπτύχθηκε ραγδαία ώστε σήμερα να μπορεί ν' αντικαταστήσει κατά ένα μεγάλο μέρος την πυρηνική κλοβατώρα. Γιατί, οι εταιρείες αυτές δε θα μπορούσαν να ελέγξουν ενεργειακά την παροχή ηλεκτρικής ισχύος τέτοιας απλής τεχνολογίας και ανεξάντλητης πρώτης ύλης.

Για τα κράτη που δεν έχουν εγκα-

ταστήσει πυρηνικούς σταθμούς είναι σχετικά εύκολο να τους αποφύγουν. Για παράδειγμα, η Ελλάδα δεν έχει εξαντλήσει ακόμα τον υδάτινο πλούτο της και φυσικά ούτε και τις δυνατότητες φωτοβολταϊκής ενέργειας από τον ήλιο και ανεμογεννήτριες (κυρίως στις νησιώτικες περιοχές).

Ευρωπαϊκές χώρες που ήδη χρησιμοποιούν πυρηνικά εργοστάσια έχουν εκφράσει την αντίθεσή τους στην παράταση λειτουργίας αντιδραστήρων σχάσης, για παράδειγμα Γερμανία, Σουηδία, Ιταλία, Αυστρία.

Η Γαλλία, με την μεγαλύτερη δέσμευση της ηλεκτρικής της ενέργειας περίπου 80% από πυρηνικούς σταθμούς έχει συσπειρώσει ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως της πρώην Σ.Ε. για αποδοχή των αντιδραστήρων σχάσης με διαφορετική μορφή (SMR).

[Από το Chernobyl στα εργοστάσια επεξεργασίας πυρηνικών αποβλήτων](#) (ΟΥΤΟΠΙΑ Μάιος-Ιούνιος 1993)

[Βυθίζουν απόβλητα στην Αδριατική](#) (ΤΟ ΒΗΜΑ 11.2.2011)

[Πυρηνικά απόβλητα οι βόμβες του ΝΑΤΟ](#)

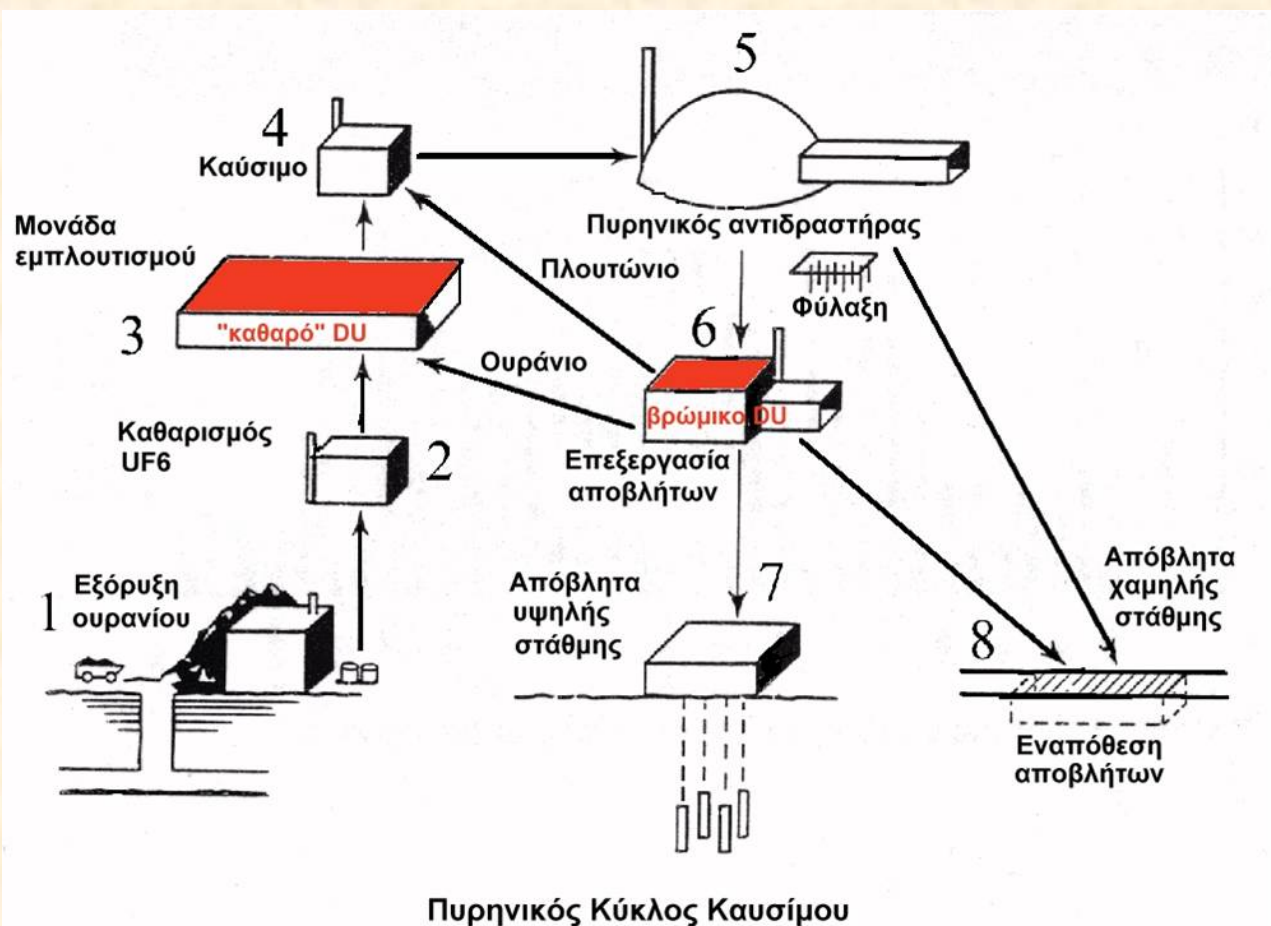
[Πυρηνικά απόβλητα-A, B](#)

[Πυρηνικά απόβλητα, το πιο επικίνδυνο και άλυτο πρόβλημα](#) (Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ, 17.2.2008)

[Πλοία... δηλητήριο](#) (ΕΛΕΥΘΕΡΟΤΥΠΙΑ 30.10.2009)

[Το μεγαλύτερο πρόβλημα των πυρηνικών](#)

[ΤΑ ΝΕΑ Συσσώρευση πυρηνικών αποβλήτων](#)



NUCLEAR WASTE

A nuclear reactor—whether large or small—is not a standalone facility. Its operation requires a network of auxiliary installations, each posing its own risks and accumulating significant amounts of radioactive material. These are clearly depicted in the diagram of the Nuclear Fuel Cycle. Radioactive waste is generated at various stages of this cycle: from uranium mining and enrichment to fuel rod fabrication, reactor use, reprocessing, and final disposal.

Even the reactor itself, at the end of its operational life (roughly 40 years), becomes nuclear waste due to its persistent radioactivity. Through the process of neutron activation, the reactor structure must be dismantled and treated as part of the waste management chain. Additionally, large quantities of radioactive material are produced at facilities for the manufacture of nuclear weapons.

Depending on radioactivity levels, nuclear waste is classified into four main categories:

1. High-level waste (HLW): Includes spent fuel from reactors and residues from its reprocessing to recover plutonium.
2. Transuranic waste (TRU): Contains mostly isotopes of plutonium with an activity above 10 Ci/gram ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ disintegrations per second). Generated mainly during fuel reprocessing, MOX fuel fabrication, and nuclear weapons production.
3. Low-level waste (LLW): Also includes transuranic elements but with ac-

tivity below 10 Ci/gram. While requiring less shielding, it remains hazardous.

4. Tailings from uranium mining and processing: Contain lower concentrations of radioactive materials but exist in very large volumes.

The hazard posed by nuclear waste depends not only on the quantity of radioactive isotopes but also on their half-lives, which in many cases are extremely long. For example, plutonium-239 has a half-life of 24,000 years. Some isotopes, like strontium-90 and cesium-137, have half-lives of around 30 years, while others, such as iodine-129 and cesium-135, exceed one million years.

The highest radioactive emissions occur during fuel replacement. Fresh fuel has low activity, while spent fuel is highly dangerous. Before reprocessing, it is stored in cooling ponds to reduce heat and radiation levels. A 1000 MW light-water reactor produces roughly 100 cubic meters of solid waste (both high- and low-level) annually. After treatment, this waste is sealed in metal containers and buried.

The most problematic material is plutonium, due to both its radioactive longevity and high chemical toxicity. Transporting it from reprocessing plants to MOX reactors poses a major accident risk. Inhalation of even minute quantities can be lethal.

Various storage solutions have been proposed, including encapsulation in glass, concrete, or steel, and burial in old mines. However, glass becomes porous over time (e.g., after 100 years), and if

water infiltrates the storage site, it can lead to radioactive leakage.

In recent years, reports of illegal dumping of nuclear waste into the sea have surfaced—an inexpensive but extremely dangerous method. Other proposals, like sending waste into space, are economically unfeasible and technically risky. The explosion of the Challenger space shuttle on January 28, 1986, just 70 seconds after launch, is a stark reminder of the dangers involved.

Even if a technically secure long-term storage solution is found, the economic cost is so high that—once accounted for—nuclear power becomes nonviable. As early as 1978, the Hamburg Electric Company noted that, while low-level waste could be stored, no solution existed for high-level waste.

It is important to emphasize that nuclear waste is not only produced in reactors, but also during uranium mining, enrichment, and fuel packaging. Reprocessing facilities are among the sites with the highest concentrations of radioactive materials in the world. Transporting waste to these plants—by ship or truck—poses serious risks of leakage or major accidents. The case of leakage in Kozloduy, Bulgaria, and the Fukushima disaster in 2011 illustrate the gravity of the problem.

By 1990, West Germany alone had already accumulated around 100,000 tons

of such waste. Since reprocessing plants are very few, radioactive materials must travel enormous distances, increasing the vulnerability of the system.

It is no coincidence that companies involved in the nuclear fuel cycle (uranium, plutonium) are closely linked with those in fossil fuels. The energy dependence of small countries on their networks is evident. Equally evident is the reason why solar energy has not been developed as much as it could: it does not allow for centralized control. Solar energy relies on simple technology, abundant raw materials, and is accessible to small and medium-sized communities.

For countries like Greece, which have not installed nuclear reactors, avoiding nuclear energy remains a viable choice. Water resources, solar energy, and wind power—especially on the islands—remain largely untapped.

Several European countries have expressed their opposition to the expansion or continued operation of nuclear reactors, such as Germany, Sweden, Italy, and Austria. In contrast, France, which relies on nuclear power for about 80% of its electricity, is attempting to promote new models (e.g., Small Modular Reactors – SMRs) as supposedly “alternative” solutions, rallying several former Eastern Bloc countries to its side.