

## Nuclear energy - Radioactive Waste

Costantinos Stamoulis<sup>1</sup> and Mirofora Pilakouta<sup>2</sup>

1. University of West Attica, Department of Electrical & Electronics Engineering  
Campus 2, P. Ralli and Thivon 250, 12244 Egaleo, Athens, Greece
2. University of West Attica, Department of Biomedical Sciences  
Campus 1, Ag. Spyridonos 28, 12243 Egaleo, Athens, Greece

### Abstract

Electricity production from conventional sources (coal, gas, oil, etc.) is accompanied by large CO<sub>2</sub> emissions that affect the environment and contribute to climate change. Electricity production from nuclear fuel has an advantage over conventional fuels due to negligible CO<sub>2</sub> emissions throughout the production cycle.

Despite the strong concerns for nuclear energy related to the safety of facilities, nuclear accidents (Chernobyl, Fukushima) as well as the pollution due to radioactive waste, the increase of the percentage of energy produced from nuclear fuels seems as a possible solution for the reduction of CO<sub>2</sub> emissions from electricity production sector.

This paper presents a brief overview of the current status of nuclear energy usage in the energy production mixture and the radioactive waste management.

**Keywords:** nuclear energy, nuclear waste, nuclear reactors, climate change, CO<sub>2</sub> emissions

## Πυρηνική Ενέργεια - Ραδιενεργά απόβλητα

### Περίληψη

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τους συμβατικούς τρόπους (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο κλπ.) συνοδεύεται από μεγάλες εκπομπές CO<sub>2</sub> που επηρεάζουν το περιβάλλον και συνεισφέρουν στην κλιματική αλλαγή.

Σε αυτό το θέμα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα πλεονεκτεί, αφού οι εκπομπές CO<sub>2</sub> σε όλο τον κύκλο παραγωγής είναι μηδαμινές. Παρά τις μεγάλες επιφυλάξεις για την χρήση πυρηνικής ενέργειας που αφορούν σε θέματα ασφάλειας των εγκαταστάσεων \_ πυρηνικά ατυχήματα (Τσερνομπίλ, Φουκουσίμα) καθώς και ρύπανσης λόγω των ραδιενεργών αποβλήτων, φαίνεται να υπερισχύει ο προβληματισμός και η ανάγκη της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι το ενδεχόμενο αύξησης του ποσοστού της παραγωγής ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικά καύσιμα αρχίζει να κερδίζει έδαφος.

Στο άρθρο αυτό θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των κυριότερων θεμάτων που σχετίζονται τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, το ρόλο της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, και θεμάτων που σχετίζονται με τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων.

---

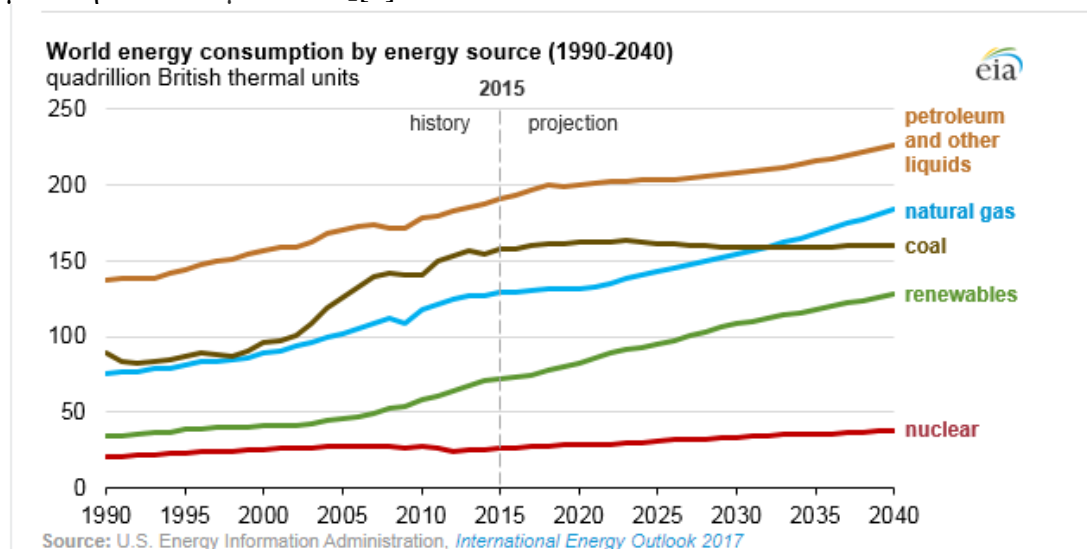
<sup>1</sup>C. Stamoulis is an undergraduate student and about to graduate this year

## Εισαγωγή

Η συνεχής βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, συνοδεύεται με αυξημένες ανάγκες σε ενέργεια και αυξημένες εκπομπές αερίων που είναι υπεύθυνες για το φαινόμενο θερμοκηπίου. Το ζήτημα προβληματίζει την παγκόσμια κοινότητα και γίνεται προσπάθεια περιορισμού των ρύπων. Οι χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης συμφώνησαν (δέσμευση) να μειώσουν ως το 2030 κατά τουλάχιστον 40% την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το επίπεδό τους το 1990 [1].

Στο σχήμα 1 φαίνεται η εξέλιξη της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από 1990-2015 καθώς και πρόβλεψη που δείχνει ότι η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας θα αυξηθεί κατά 28% μεταξύ 2015 και 2040 [2].

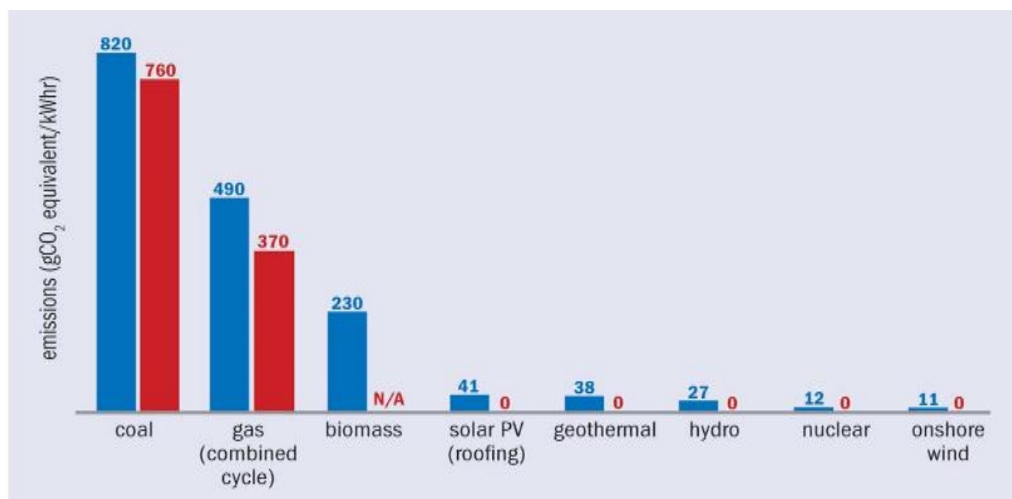
Με τον ενεργειακό τομέα να ελευθερώνει περίπου το 25% των εκπομπών CO<sub>2</sub> [3], η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα πλεονεκτεί σε σχέση με τους υπόλοιπους τρόπους παραγωγής ενέργειας αφού οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγονται από τον πλήρη κύκλο μίας πυρηνικής μονάδας είναι σχεδόν μηδαμινές (σχήμα 2). Το πλεονέκτημα αυτό προδιαθέτει θετικά την παγκόσμια κοινότητα ως προς την χρήση πυρηνικής ενέργειας [4] και γίνονται πλέον συζητήσεις για την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα ως καλή λύση για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> [5].



Σχήμα 1: Παγκόσμια Κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή ενέργειας.(1990-2040)

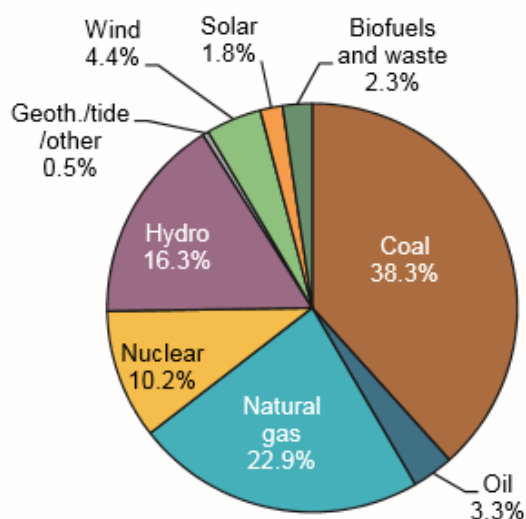
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στο ενεργειακό μείγμα που χρησιμοποιήθηκε το 2017 για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως (σχήμα 3), το 10.2% προερχόταν από πυρηνικά καύσιμα [6].

Παρόλη την θετική στάση που αναπτύσσεται για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας με πυρηνικά καύσιμα για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, εξακολουθούν να υπάρχουν μεγάλες επιφυλάξεις για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας με κυριότερες α) το θέμα της ασφάλειας των εγκαταστάσεων (πυρηνικά ατυχήματα Τσερνομπίλ, Φουκουσίμα περιλαμβανομένης και της πιθανότητας τρομοκρατικών ενεργειών) και β) το θέμα των ραδιενεργών αποβλήτων και τη δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισής τους [7].



Σχήμα 2: Συγκριτικές εκπομπές CO<sub>2</sub> για τις διάφορες ενεργειακές τεχνολογίες. Με μπλε εκπομπές για όλο τον κύκλο ζωής. Κόκκινο οι άμεσες εκπομπές της εγκατάστασης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης στους πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συνδυασμό με τη θέση της πυρηνικής ενέργειας στο παγκόσμιο μείγμα παραγωγής ενέργειας καθώς και της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, που γενικά είναι άγνωστα θέματα στο ευρύ κοινό [8, 9]. Ειδικότερα, στην Ελλάδα ο μοναδικός ερευνητικός πυρηνικός αντιδραστήρας που υπάρχει, είναι στο στάδιο παροπλισμού. Πιο αναλυτικές πληροφορίες και σχετική βιβλιογραφία μπορεί να αναζητηθούν μεταξύ άλλων και στην πτυχιακή εργασία Κ. Σταμούλης [10].



Σχήμα 3 : Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού ανά καύσιμο -στοιχεία 2017

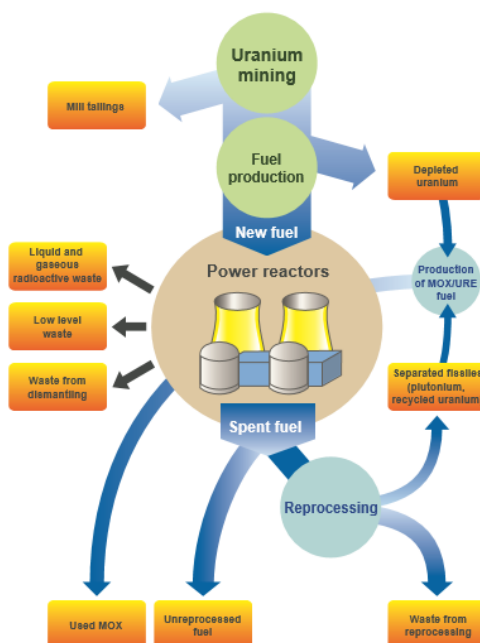
## Πυρηνική Ενέργεια

Η παραγωγή ενέργειας από πυρηνικό καύσιμο, οφείλεται στην Πυρηνική Σχάση, που υφίσταται οι πυρήνες του πυρηνικού καυσίμου (πχ U-235) όταν απορροφήσουν ένα νετρόνιο κατάλληλης ενέργειας. Η σχάση, «σπάσιμο», του πυρήνα δίνει ένα

συνδυασμό από ελαφρύτερους περίπου ίδιας μάζας πυρήνες και 2-3 νετρόνια τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σχάση σε άλλους πυρήνες, να παραχθούν ξανά νετρόνια και να επαναληφθεί η διαδικασία (αλυσιδωτή αντίδραση). Από τη σχάση των πυρήνων ελευθερώνεται τεράστιο ποσό ενέργειας που μετατρέπεται σε θερμότητα. Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες η παραγόμενη θερμική ισχύς είναι ελεγχόμενη, (ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση). Με κατάλληλη διαδικασία παράγεται ατμός ο οποίος κινεί μια στροβιλογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την λειτουργία ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, παράγονται απόβλητα τα οποία είναι ραδιενεργά και πρέπει να τυγχάνουν ειδικής διαχείρισης, λόγω της επικινδυνότητάς τους για την υγεία και το περιβάλλον.

### Αναλωμένα καύσιμα – Ραδιενεργά απόβλητα

Μια μονάδα παραγωγής ενέργειας με πυρηνικά καύσιμα, παράγει αναλωμένα καύσιμα (πυρηνικά κατάλοιπα) και ραδιενεργά απόβλητα κατά τη λειτουργία της (σχήμα 4). Με τον όρο ραδιενεργά απόβλητα εννοούμε το ραδιενεργό υλικό σε αέρια, στερεά ή υγρή μορφή για το οποίο δεν προβλέπεται κάποια περαιτέρω χρήση. Ως αναλωμένα καύσιμα ορίζονται τα πυρηνικά καύσιμα που έχουν ακτινοβοληθεί και έχουν απομακρυνθεί οριστικά από τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Μπορούν είτε να θεωρούνται ως χρησιμοποιήσιμοι πόροι με δυνατότητα επανεπεξεργασίας είτε να προορίζονται για τελική διάθεση χωρίς να προβλέπεται περαιτέρω χρήση και να αντιμετωπίζονται ως ραδιενεργά απόβλητα.



Σχήμα 4: Διάγραμμα προέλευσης πυρηνικών αποβλήτων σε σχέση με τον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου [11]

Στα ραδιενεργά απόβλητα, πέραν από το εναπομείναν ανεκμετάλλευτο καύσιμο περιλαμβάνονται επίσης πολλά μέρη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα που καθίστανται ραδιενεργά λόγω του βομβαρδισμού τους με νετρόνια και της παραγωγής στο σώμα τους μιας σειράς ραδιενεργών πυρήνων (ραδιονουκλίδια).

## Ραδιονουκλίδια που περιέχονται στα απόβλητα

Τα ραδιονουκλίδια διασπώνται εκπέμποντας α ή β ακτινοβολία (σωματιδιακή) και συνήθως συνοδεύονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γ ακτινοβολία που είναι και η πλέον διεισδυτική. Κάθε ραδιονουκλίδιο χαρακτηρίζεται από τον χρόνο ημιζωής, που είναι ο χρόνος στον οποίο διασπώνται τα μισά άτομά του, δηλαδή ο χρόνος στον οποίο η ενεργότητά του (ρυθμός διάσπασης) υποδιπλασιάζεται. Ανάλογα με τον χρόνο ημιζωής τους, τα ραδιονουκλίδια χαρακτηρίζονται ως βραχύβια ή μακρόβια. Μέρος από τα ραδιενεργά απόβλητα μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας με πυρηνικά καύσιμα μπορεί να παραμείνουν ραδιενεργά για δεκάδες, εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια. Η επικινδυνότητα των ραδιενεργών αποβλήτων σχετίζεται με το επίπεδο της ενεργότητάς τους, το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (α,β,γ) και τον χρόνο ημιζωής τους.

Στον πίνακα 1 φαίνονται οι πιο σημαντικές αντιδράσεις ενεργοποίησης που δύνανται να πραγματοποιηθούν σε ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, τα ραδιονουκλίδια που παράγονται, το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και οι χρόνοι ημιζωής τους - σε χρόνια [12].

Κάποια από τα προϊόντα σχάσης μέσης διάρκειας ζωής (χρόνοι ημιζωής ~30 έτη) που τυγχάνουν ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι τα ραδιονουκλίδια Cs-137, Sr-90. Τα πλέον μακρόβια ραδιονουκλίδια, εμφανίζονται στα αναλωμένα καύσιμα και είναι ακτινίδες U-234, Np-237, Pu-238 και Am-241.

Επισημαίνεται ότι ραδιενεργά απόβλητα, εκτός από τα πυρηνικά εργοστάσια και τους ερευνητικούς αντιδραστήρες, παράγονται επίσης από την πυρηνική ιατρική, τη βιομηχανία καθώς και από την εξόρυξη ορυκτών. Το μεγαλύτερο ποσοστό (~95%) και τα πιο επικίνδυνα σε βάθος χρόνου, παράγονται από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, κυρίως από την διαχείριση αναλωμένου καυσίμου [12]. Στο άρθρο αυτό, γίνεται αναφορά στα απόβλητα που αφορούν στον πλήρη κύκλο λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, ενώ οι γενικές αρχές της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων που καταγράφονται, καλύπτουν και τα ραδιενεργά απόβλητα από άλλες πηγές.

### Διαχείριση αποβλήτων - Κατηγοριοποίηση

Η οδηγία 2011/70/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 19ης Ιουλίου 2011 [13], με την οποία θεσπίζεται το κοινοτικό πλαίσιο για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, ορίζει τα ακόλουθα:

«Τα ραδιενεργά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των αναλωμένων καυσίμων που θεωρούνται απόβλητα, απαιτούν περιορισμό και απομόνωση από τους ανθρώπους και το περιβάλλον διαβίωσής τους μακροπρόθεσμα. Λόγω της συγκεκριμένης φύσης τους (περιεκτικότητα σε ραδιονουκλίδια), απαιτούνται ρυθμίσεις για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος έναντι κινδύνων οι οποίοι προκύπτουν από την ιοντίζουσα ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένης της διάθεσης σε κατάλληλες εγκαταστάσεις, όπως στην τελική τοποθεσία».

Επίσης τονίζεται (παράγραφος 24) ότι «αποτελεί ηθική υποχρέωση κάθε κράτους μέλους να αποφεύγει τις άσκοπες επιβαρύνσεις για τις μελλοντικές γενιές σε σχέση με τα αναλωμένα καύσιμα και τα ραδιενεργά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων τυχόν ραδιενεργών αποβλήτων που αναμένεται να προκύψουν από τον παροπλισμό υπαρχουσών πυρηνικών εγκαταστάσεων».

**Πίνακας 1: Οι σημαντικότερες αντιδράσεις ενεργοποίησης και τα αντίστοιχα ραδιονουκλίδια που δημιουργούνται [12].**

Parent	Nuclear reaction	Daughter nuclide	Principal emissions	Half-life of daughter (a)	Abundance of parent nuclide in parent element (%)
Li-6	n,α	H-3	β <sup>-</sup>	12.3	7.5
C-13	n,γ	C-14	β <sup>-</sup>	5 730	1.1
N-14	n,p	C-14	β <sup>-</sup>	5 730	99.6
Na-23	n,2n	Na-22	β <sup>+</sup> , EC	2.6	100
Na-23	γ,n	Na-22	β <sup>+</sup> , EC	2.6	100
Cl-35	n,γ	Cl-36	β <sup>-</sup> (β <sup>+</sup> , EC)	301 000	75.8
K-39	n,p	Ar-39	β <sup>-</sup>	269	93.3
Ca-40	n,γ	Ca-41	EC	103 000	96.9
Fe-54	n,p	Mn-54	EC, γ	0.86	5.9
Mn-55	n,2n	Mn-54	EC, γ	0.86	100
Fe-54	n,γ	Fe-55	EC, X	2.7	5.9
Ni-58	n,γ	Ni-59	EC, X	76 000	68.3
Ni-62	n,γ	Ni-63	β <sup>-</sup>	100	3.6
Co-59	n,γ	Co-60	β <sup>-</sup> , γ	5.3	100
Zn-64	n,γ	Zn-65	EC, β <sup>+</sup>	0.67	48.6
Zr-92	n,γ	Zr-93	β <sup>-</sup>	1 500 000	17.1
Mo-92	n,γ	Mo-93	EC, X	3 500	14.8
Nb-93	n,γ	Nb-93m	IT, X	15.8	100
Nb-93	n,γ	Nb-94	β <sup>-</sup> , γ	20 000	100
Mo-94	n,p	Nb-94	β <sup>-</sup> , γ	20 000	9.3
Mo-98	n,γ	Tc-99	β <sup>-</sup>	213 000	24.1
Ag-107	n,γ	Ag-108m	EC, γ	130	51.8
Ag-109	n,γ	Ag-110m	β <sup>-</sup> , γ	0.68	48.2
Sn-124	n,γ	Sb-125	β <sup>-</sup> , γ	2.76	5.8
Ba-132	n,γ	Ba-133	EC, X, γ	10.5	0.1
Eu-151	n,γ	Eu-152	EC, X, β <sup>-</sup> , γ	13.5	47.8
Eu-153	n,γ	Eu-154	β <sup>-</sup> , γ, X	8.6	52.2
Eu-154	n,γ	Eu-155	β <sup>-</sup> , γ, X	4.76	0

Η διαχείριση αποβλήτων είναι μια πολύπλοκη και πολυθεματική διαδικασία που απαιτεί συνεργασία μιας μεγάλης γκάμας επιστημονικών ειδικοτήτων με εξειδικευμένο επιστημονικό υπόβαθρο και έχει ένα τεράστιο κόστος. Επισημαίνεται ότι εδώ γίνεται μια πολύ σύντομη καταγραφή των πιο βασικών στοιχείων αυτής της διαχείρισης:

- στόχος της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων είναι η συλλογή, η επεξεργασία, η αποθήκευση, η μεταφορά και η απόρριψη τους κατά τρόπο που να προστατεύει την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Γενικά σε όλα τα στάδια της ζωής μίας εγκατάστασης πρέπει να διασφαλίζεται ότι η παραγωγή

ραδιενεργών αποβλήτων παραμένει στο ελάχιστο εφικτό επίπεδο, τόσο σε όγκο όσο και ενεργότητα.

- Με κατάλληλη πρόβλεψη των ροών αποβλήτων από διάφορα μέρη της εγκατάστασης και εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών διαχωρισμού πριν την υλοποίηση της εγκατάστασης μπορεί να περιοριστεί το κόστος διαχείρισης.
- Συγκροτείται και υλοποιείται κατάλληλο πρόγραμμα κατηγοριοποίησης και διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, περιλαμβανομένης κάθε είδους μεταχείρισης, επεξεργασίας και προσωρινής αποθήκευσης. Το πρόγραμμα αυτό διασφαλίζει ότι η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων είναι συμβατή με τις προϋποθέσεις για την τελική τους διάθεση και αυστηρά ελεγχόμενη από άποψη ακτινοπροστασίας, πυρηνικής προστασίας και διασφάλισης των πυρηνικών υλικών.

### **Ταξινόμηση - Κλάσεις**

Με βάσει τις ραδιολογικές ιδιότητες των περιεχομένων ραδιονουκλιδίων (ενεργότητα, χρόνος ημιζωής) τα απόβλητα ταξινομούνται (ΙΑΕΑ) ως ακολούθως :

- Απαλλασσόμενα Απόβλητα (Exempted Waste (EW))
- Απόβλητα Χαμηλού Επιπέδου ( Low Level Waste (LLW))
- Βραχύβια Απόβλητα Χαμηλού Επιπέδου ((Low Level Waste-Short Lived (LLW-SL))
- Μακρόβια Απόβλητα Χαμηλού Επιπέδου (Low Level Waste-Long Lived (LLW-LL))
- Απόβλητα Μεσαίου Επιπέδου (Intermediate Level Waste (ILW))
- Απόβλητα Υψηλού Επιπέδου (High Level Waste (HLW))

Στον πίνακα 2, παρουσιάζεται η ταξινόμηση που χρησιμοποιεί η ΙΑΕΑ [14], περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης καθώς και επιλογές διάθεσης (θα γίνει αναφορά στη συνέχεια).

### **Προεργασία\_ Κατεργασία**

Γενικά η κατηγοριοποίηση καθορίζει και τον τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων. Τα απόβλητα ομαδοποιούνται με βάση το σημείο προέλευσης τους, την υλική τους υπόσταση (Υγρή, Στερεή, Αέρια), τον τύπο (υγρά ή ξηρά στερεά απόβλητα, υπολείμματα, λάσπη, μέταλλο, μεγάλα μέρη της εγκατάστασης εύφλεκτα κτλ), τις ιδιότητες (ραδιενεργές, φυσικές, χημικές) και τις επιλογές επεξεργασίας. Η προεργασία περιλαμβάνει εργασίες, όπως ο διαχωρισμός ως προς υλική υπόσταση και μείωση του όγκου ανάλογα με την κατάσταση των αποβλήτων (αποτέφρωση, εξάτμιση, χημικές κατεργασίες, φιλτράρισμα), με προσοχή να μην αναμειγνύονται βραχύβια με μακρόβια (μη ανάμειξη ροών αποβλήτων).

Στη συνέχεια υφίστανται κατεργασία ώστε να καταλήξουν σε μια στερεή και σταθερή μορφή που να συμμορφώνεται με τα κριτήρια αποδοχής αποθήκευσης ή αποκομιδής (κατεργασμένα απόβλητα). Για παράδειγμα τα υγρά LLW και ILW τυπικά στερεοποιούνται σε τσιμέντο, ενώ το HLW πυρώνονται / ξηραίνονται και μετά υαλοποιούνται. Τα σταθεροποιημένα πλέον απόβλητα τοποθετούνται σε δοχεία κατάλληλα για τα χαρακτηριστικά τους (τη χημική τους δραστηριότητα, τοξικότητα κλπ) για αποφυγή διάβρωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα βραχύβια απόβλητα αποθηκεύονται για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται ώστε να μειωθεί η ενεργότητά τους και να χαρακτηριστούν ως απαλλασσόμενα απόβλητα (exempted waste) ενώ τα HLW που παράγουν θερμική ενέργεια (διασπώνται με  $\alpha$  ακτινοβολία), φυλάσσονται προσωρινά σε δεξαμενές νερού μέχρι να μειωθεί η θερμοκρασία τους και μετά να υποστούν επεξεργασία.

**Πίνακας 2: Ταξινόμηση ραδιενεργών αποβλήτων από ΙΑΕΑ και επιλογές διάθεσης**

Κατηγορία Αποβλήτων	Τυπικά Χαρακτηριστικά	Επιλογές Απόρριψης
Απαλλασσόμενα Απόβλητα	Επίπεδα ενεργότητας κάτω του επιτρεπτού εθνικού ορίου το οποίο ορίζεται ως η ετήσια δόση για το κοινό κάτω από 0.01 mSv	Κανένας ραδιολογικός περιορισμός
Χαμηλού και Μέσου Επιπέδου Απόβλητα Βραχύβια Απόβλητα  Μακρόβια Απόβλητα	Επίπεδα ενεργότητας πάνω από το επιτρεπτό όριο με θερμική ενέργεια κάτω των $2\text{kW/m}^3$  Περιορισμένες συγκεντρώσεις μακρόβιων ραδιονουκλιδίων (το όριο των μακρόβιων ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν σωματίδια άλφα είναι τα 4000 Bq/g ανά πακέτο αποβλήτων)  Συγκεντρώσεις μακρόβιων ραδιονουκλιδίων που ξεπερνούν τους περιορισμούς των βραχύβιων αποβλήτων	Απόρριψη κοντά στην επιφάνεια της γης ή σε υπόγεια εγκατάσταση  Εναπόθεση σε υπόγεια εγκατάσταση
Απόβλητα Υψηλού Επιπέδου	Θερμική ενέργεια άνω των $2\text{kW/m}^3$ και συγκεντρώσεις μακρόβιων ραδιονουκλιδίων που ξεπερνούν τους περιορισμούς των βραχύβιων αποβλήτων	Εναπόθεση σε υπόγεια εγκατάσταση

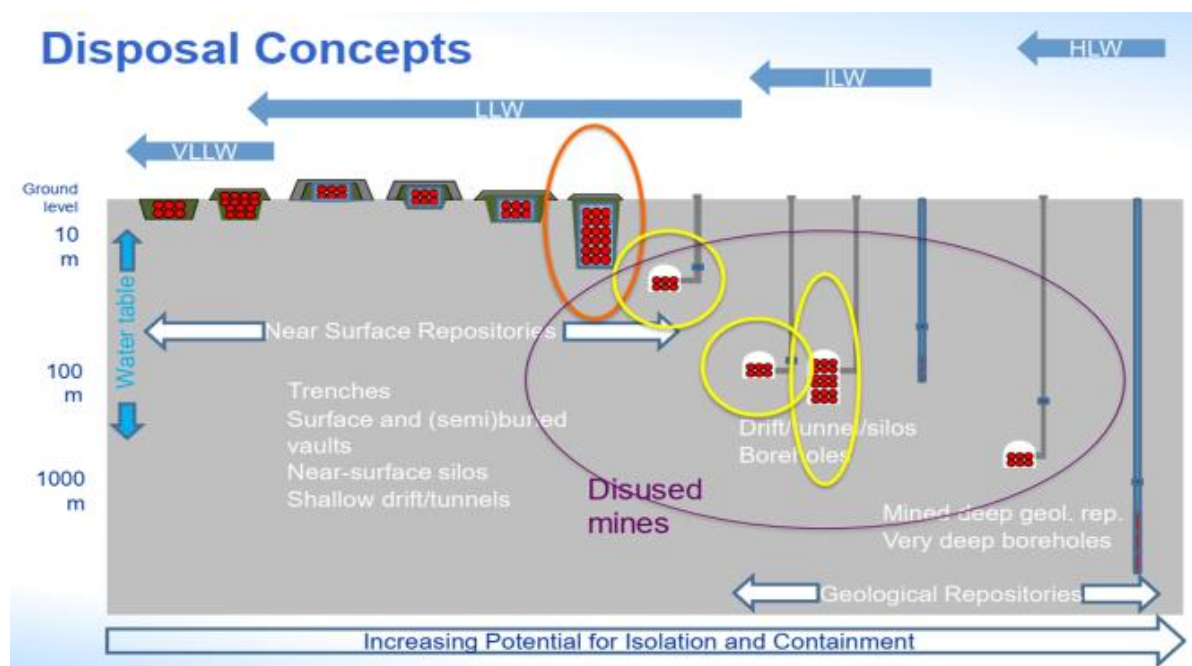
### **Αποκομιδή – Ταφή**

Η «διάθεση» των αποβλήτων γίνεται όταν δεν προβλέπεται πλέον κάποια χρήση. Με βάση την ταξινόμηση, (πίνακας 2), ως προς την ενεργότητα και μακροβιότητα θα γίνει η επιλογή του τρόπου ταφής.

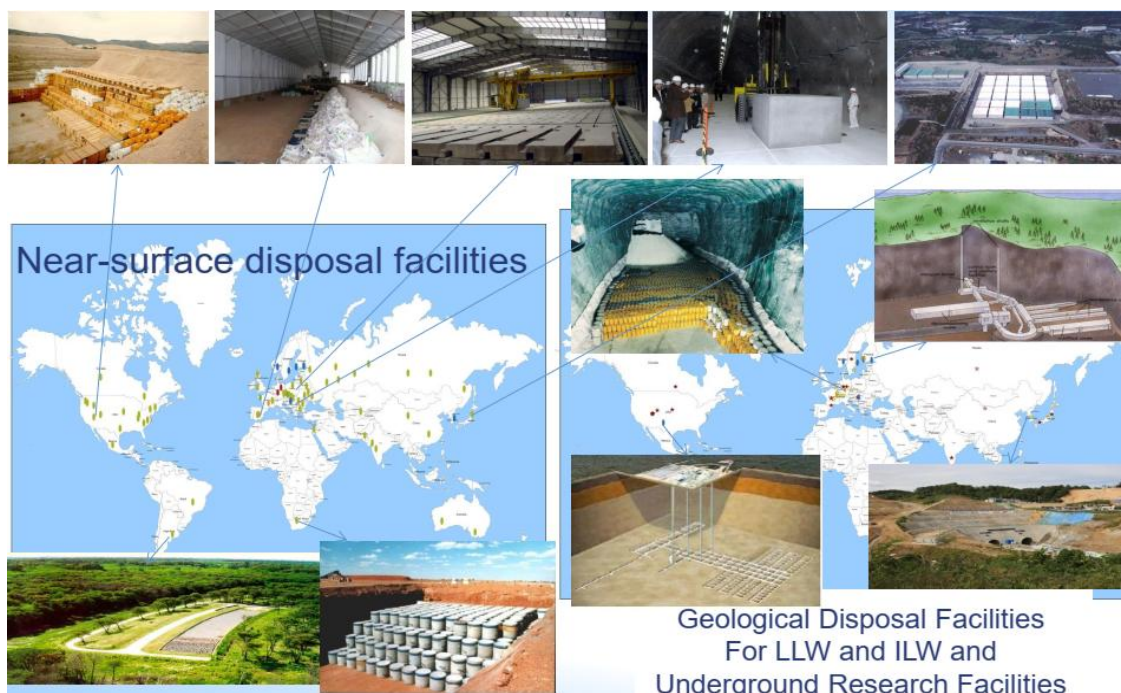


Γενικότερος στόχος είναι ή αποφυγή ή μείωση της αλληλεπίδρασης νερού με τα απόβλητα. Η ταφή προτιμάται σε μεγάλο ποσοστό των περιπτώσεων καθώς είναι η πιο οικονομική και ασφαλής λύση. Σαν διαδικασία επηρεάζεται από παράγοντες όπως:

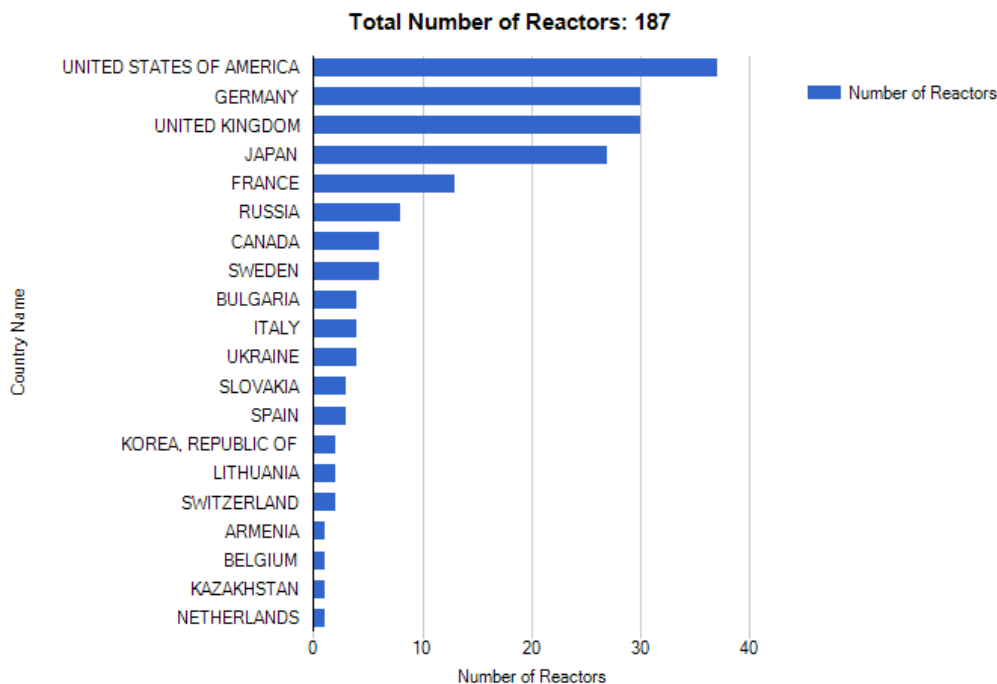
- Η εθνική πολιτική σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων
- Οι διαθέσιμοι πόροι και το ανθρώπινο δυναμικό
- Η διαθέσιμη υποδομή



Σχήμα 5: Επιλογές αποκομιδής ανάλογα με την κλάση αποβλήτων [15]



Εικόνα 1: Διάφορες τοποθεσίες ταφής κοντά στην επιφάνεια της γης. [16]



**Σχήμα 6: Ο συνολικός αριθμός των αντιδραστήρων που θα τεθούν εκτός λειτουργίας στο άμεσο μέλλον**

Υπάρχουν τρεις βασικές επιλογές, ανάλογα με την κατηγορία ( σχήμα 5)[15]:

- Απόρριψη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (χαντάκια, λάκκοι)
- Αποκομιδή σε σπήλαια με ενδιάμεσο βάθος (τούνελ, σιλό)
- Ταφή σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς (παλαιά ορυχεία, βαθιές γεωτρήσεις)

Γενικά υπάρχουν μεγάλες δυσκολίες στην κατάρτιση προϋπολογισμού για ένα τόσο πολυπαραγοντικό θέμα, όπως η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων διότι υπάρχει ανάγκη πρόβλεψης οικονομικών πηγών για κόστος που θα παρουσιαστεί στο μέλλον και αφορά σε ενέργειες που έγιναν στο παρελθόν. Ο προϋπολογισμός μπορεί να αλλάζει κατά την διάρκεια εκτέλεσης του έργου λόγω αντιμετώπισης εκτάκτων καταστάσεων που δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθούν. Η αντιμετώπιση αυτού του κόστους γίνεται συνήθως με σύσταση ειδικού ταμείου χρηματοδότησης για τη διαχείριση. Χονδρικά το κόστος διαχείρισης και διάθεσης αντιπροσωπεύει το 5% του ολικού κόστους της ενέργειας που παράγεται [18].

Χώρες με «μικρή ποσότητα» αποβλήτων δεν μπορούν να έχουν αποθετήρια λόγω κόστους. Γίνεται προσπάθεια για δημιουργία πολυεθνικών αποθετηρίων αποβλήτων που κατόπιν διακρατικής συμφωνίας να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από χώρες με μικρό όγκο αποβλήτων [19].

Η όποια επιλογή πρέπει να προβλέπει τα θέματα ασφάλειας που μπορεί να προκύψουν, όπως επίσης να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή. Στην εικόνα 1, παρουσιάζονται διάφορες τοποθεσίες ταφής κοντά στην επιφάνεια της γης.

## **Πρόβλεψη Κόστους - Χρηματοδότηση**

Σύμφωνα με την Οδηγία 2011/70/Ευρατόμ[13], κάθε κράτος μέλος είναι υπεύθυνο και αναλαμβάνει τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται εντός της επικράτειας της. Έτσι πρέπει εκ των προτέρων να προϋπολογιστεί το κόστος διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται όσον κατά τη λειτουργία όσο και κατά την αποσυναρμολόγηση/αδρανοποίηση/παροπλισμό του Πυρηνικού Αντιδραστήρα[17].

## **Πυρηνικοί αντιδραστήρες \_ Κατάσταση Σήμερα**

Οι πρώτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες ξεκίνησαν να λειτουργούν τη δεκαετία 1950 και στα μέσα της δεκαετίας 80 υπήρξε ιστορικό μέγιστο έναρξης λειτουργίας νέων μονάδων[20]. Όπως είναι αναμενόμενο τα επόμενα χρόνια ένα μεγάλο μέρος υπαρχόντων πυρηνικών αντιδραστήρων θα παροπλιστούν μια και έχουν κλείσει τον κύκλο ζωής τους. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΙΑΕΑ(σχήμα6)[21], περίπου 187 αντιδραστήρες θα τεθούν εκτός λειτουργίας (παροπλισμός) στο άμεσο μέλλον. Επιπλέον σήμερα 55 νέοι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι υπό κατασκευή, οι περισσότεροι στην Ασία[22].

Είναι εμφανές ότι η δεδομένη κατάσταση οδηγεί σε αυξημένη ζήτηση για στρατηγικές και τεχνολογίες στον τομέα του πυρηνικού παροπλισμού και της διαχείρισης αποβλήτων[23]. Η πυρηνική τεχνολογία θεωρείται πεδίο που θα έχει μεγάλη ανάπτυξη για τα επόμενα χρόνια (ένας παροπλισμός μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 30 χρόνια) και έχει τεράστιο οικονομικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον[24]. Ενδεικτικά αναφέρεται, σύμφωνα με τους υπολογισμούς των πυρηνικών φορέων εκμετάλλευσης της ΕΕ, θα χρειαστούν περισσότερα από 120 δισεκατομμύρια ευρώ για τον παροπλισμό των πυρηνικών αντιδραστήρων στα επόμενα 30 χρόνια. Επομένως, υπάρχει ένα ισχυρό οικονομικό κίνητρο για τη χρηματοδότηση της ανάπτυξης καινοτόμων τεχνολογιών και της βελτίωσης της αποδοτικότητας της τεχνολογίας στον τομέα αυτό.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί και η αύξηση του ενδιαφέροντος της ΕΕ για διατήρηση της τεχνογνωσίας αλλά και ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών για τη μείωση της ρύπανσης και του κόστους διαχείρισης αποβλήτων, χρηματοδοτώντας δράσεις για καινοτομία στην πυρηνική εκπαίδευση χρησιμοποιώντας ή / και αναπτύσσοντας νέες μεθόδους και εργαλεία με βάση τις πιο πρόσφατες παιδαγωγικές γνώσεις, συμπεριλαμβανομένων πρακτικών ασκήσεων, προκειμένου να καταστεί το πεδίο πιο ελκυστικό για μια νεότερη γενιά[24].

## **Σύνοψη**

Η πυρηνική ενέργεια λόγω των μηδαμινών εκπομπών CO<sub>2</sub> έρχεται ξανά στο προσκήνιο συζήτησης ως λύση που θα μετριάσει τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής. Τα ραδιενεργά απόβλητα, παρά την τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί και την τεράστια προόδο που έχει γίνει στο θέμα της διαχείρισής τους εξακολουθούν να προβληματίζουν έντονα την παγκόσμια κοινότητα. Ο μεγάλος αριθμός των πυρηνικών αντιδραστήρων που θα παροπλιστούν στα επόμενα χρόνια απαιτεί περεταίρω βελτίωση και ανάπτυξη της τεχνολογίας και τεχνογνωσίας στον τομέα του πυρηνικού παροπλισμού και της διαχείρισης αποβλήτων. Επομένως, η πυρηνική

τεχνολογία αναμένεται να έχει μεγάλη ανάπτυξη για τα επόμενα χρόνια με τεράστιο οικονομικό, τεχνολογικό αλλά και εκπαιδευτικό ενδιαφέρον.

### *Συντομογραφίες*

EIA (US Energy Information Administration)  
EPA (U.S. Environmental Protection Agency)  
IAEA (International Atomic Energy Agency)  
IEA (International Energy Agency)  
NEA (Nuclear Energy Agency)  
PRIS IAEA (Power Reactor Information System \_IAEA)

### *Βιβλιογραφία*

- [1] EUROPEAN COMMISSION, “2030 climate & energy framework,” 2020. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en).
- [2] EIA, “International Energy Outlook 2017 \_EIA projects 28% increase in world energy use by 2040,” 2017. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32912>.
- [3] EPA, “Global Greenhouse Gas Emissions Data,” 2019. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
- [4] World Nuclear Association, “Energy Return on Investment,” 2020. <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energy-analysis-of-power-systems.aspx> (accessed May 03, 2020).
- [5] IAEA, “Nuclear Technology review,” 2019, [Online]. Available: <http://www.astm.org/Standards/nuclear-technology-standards.html>.
- [6] IEA, “Electricity Information: Overview,” 2019. [Online]. Available: <https://webstore.iea.org/electricity-information-2019-overview>.
- [7] MIT, “The Future of Nuclear Power,” 2003. [Online]. Available: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2003/07/MITEI-The-Future-of-Nuclear-Power-Executive-Summary.pdf>.
- [8] M. Pilakouta, “TEI Piraeus students’ knowledge on the beneficial applications of nuclear physics : Nuclear energy , radioactivity - consequences,” *e-Journal Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 15–21, 2019, [Online]. Available: [http://e-jst.teiath.gr/issues/issue\\_63/Pilakouta\\_63.pdf](http://e-jst.teiath.gr/issues/issue_63/Pilakouta_63.pdf).
- [9] Pilakouta M. and Sinatkas J., “Surveying undergraduate Greek student’s knowledge on some issues of radiations and nuclear energy,” 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2006.03549>.
- [10] Κ. Σταμούλης, “Πτυχιακή Εργασία ‘Τεχνολογία Πυρηνικής Ενέργειας και Διαχείριση Αποβλήτων,’” Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2020.
- [11] Wikipedia, “Nuclear fuel.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_fuel](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel) (accessed Mar. 05, 2020).
- [12] IAEA, “Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for

- Decommissioning Purposes,” *IAEA Tech. REPORTS Ser. No. 389*, pp. 1–184, 1998.
- [13] EUROPEAN COMMISSION, “Euratom Directive 2011/70 (19/07/2011),” 2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0070> (accessed Mar. 05, 2020).
- [14] IAEA, *Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1*. Vienna: IAEA, 2009.
- [15] N. Chapman, “Disposal Options: Group 1 Silos, Caverns and Disused Mines,” no. May, p. 48, 2019.
- [16] S. Mayer, “Disposal Options for Radioactive Waste RW inventories generated from use of Nuclear Technologies,” no. September, 2016.
- [17] EUROPEAN COMMISSION, “Οδηγία Ευρωπαϊκού Συμβουλίου 2006/851 (24/10/2006),” 2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0070>.
- [18] World Nuclear Association, “Radioactive Waste Management,” 2020. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx> (accessed Jun. 03, 2020).
- [19] S. A. Feinhals J., Kemp D., “Disposal Facilities for Countries without Nuclear Power Programme, 01 – 09/ ID 36. National Policy, Strategy & Framework for Radioactive Waste Management,” in *IAEA International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management*, 2016.
- [20] World Nuclear Industry Report, “The World Nuclear Industry Status Report 2018,” 2018. <https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2018-HTML#generaloverviewworldwide>.
- [21] PRIS IAEA, “Shutdown Reactors By Country,” 2020. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ShutdownReactorsByCountry.aspx>.
- [22] World Nuclear Association, “Plans For New Reactors Worldwide.” <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx> (accessed Apr. 06, 2020).
- [23] Nuclear Energy Agency \_Organisation for Economic Co-operation and Development, “Nuclear Power in 2019 NEA Activities by Sector General Information,” 2019. [http://www.oecd-nea.org/pub/activities/ar2019/ar2019.pdf?utm\\_source=mnb&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=june2020](http://www.oecd-nea.org/pub/activities/ar2019/ar2019.pdf?utm_source=mnb&utm_medium=email&utm_campaign=june2020).
- [24] EUROPEAN COMMISSION, “COMMISSION IMPLEMENTING DECISION of 14.12.2018 Work Programme 2019-2020,” 2019. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/euratom/h2020-wp1920-euratom_en.pdf).