



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.



ΚΟΥΡΓΙΑΝΤΑΚΗΣ ΡΑΦΑΗΛ

ΡΑΔΙΟΛΟΓΙΚΟΣ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
ΥΛΙΚΩΝ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΔΙΑΚΑΚΗ ΜΑΡΙΑ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ', ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΘΕΟΔΩΡΑ, ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ Γ', ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

ΔΙΑΚΑΚΗ ΜΑΡΙΑ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΚΟΚΚΟΡΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του (Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α.) του ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ', σε συνεργασία με τη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Με την ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά όσους βοήθησαν και στήριξαν την προσπάθεια αυτή τον τελευταίο χρόνο.

Θα ήθελα, αρχικά, να ευχαριστήσω την Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ Μαίρη Διακάκη, που με εμπιστεύτηκε και με σύστησε στη ομάδα σύντηξης του Δημόκριτου. Χωρίς τη συμβολή της η όμορφη περίοδος στο Ι.Π.Ρ.Ε.Τ.Ε.Α. και η γνωριμία μου με όλο το αξιόλογο επιστημονικό δυναμικό του, πιθανώς να μην είχε συμβεί. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή ΕΜΠ Μιχάλη Κόκκορη, την Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ Ρόζα Ζάννη-Βλαστού και όλη την ομάδα Πυρηνικής Φυσικής της ΣΕΜΦΕ για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που έχουν δημιουργήσει. Η αλληλεπίδραση μαζί τους με βοήθησε να έρθω σε επαφή με διάφορα κομμάτια της πυρηνικής φυσικής και να βελτιώσω τον τρόπο σκέψης μου.

Οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ όλων στην Ερευνήτρια Γ' του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ', Θεοδώρα Βασιλοπούλου, καθώς χωρίς την τεράστια υποστήριξη και αμέριστη βοήθειά της, η εργασία αυτή δε θα μπορούσε να υλοποιηθεί. Από την πρώτη στιγμή με έκανε να αισθάνομαι ότι βρίσκομαι σε ένα οικείο και ασφαλές περιβάλλον, στο οποίο μπορώ να αναπτύξω τις σκέψεις και τους προβληματισμούς μου χωρίς ντροπή. Το κλίμα συνεργασίας και συναδελφικότητας που δημιούργησε, αλλά και η συμπαράσταση και η κατανόηση που έδειξε ανελλιπώς, ακόμα και για θέματα εκτός των πλαισίων της εργασίας, ήταν πράγματα που εκτίμησα και που έκαναν τις ώρες στον Δημόκριτο ακόμα πιο ευχάριστες και δημιουργικές. Εκτός από εξαιρετική επιστήμονας, είναι και ένας φοβερός άνθρωπος που ξεχωρίζει από την πρώτη στιγμή. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και προς την υπόλοιπη ομάδα του εργαστηρίου του ΙΠΡΕΤΕΑ. Με υποδέχτηκαν εγκάρδια και μέσα σε λίγους μόλις μήνες μπορώ να πω πως πρόκειται όχι μόνο για σπουδαίους επιστήμονες, αλλά και για υπέροχους ανθρώπους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους δικούς μου ανθρώπους, οικογένεια και φίλους, που αποτέλεσαν στήριγμα σε όλη αυτή την προσπάθεια, ο καθένας με τον τρόπο του. Υπέμειναν όλη τη χρονιά να με ακούν για ώρες να μιλάω για ραδιενεργά ισότοπα, προσομοιώσεις Monte Carlo και ενεργότητες, κάνοντας με να νιώθω πολύ τυχερός που τους έχω.

Κουργιαντάκης Ραφαήλ

© (2023) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τον χαρακτηρισμό υλικών που ακτινοβολήθηκαν στον αντιδραστήρα σύντηξης Joint European Torus (JET), του Ηνωμένου Βασιλείου, εξετάζοντας από ραδιολογική σκοπιά την καταλληλότητά τους ως δομικά και λειτουργικά συστατικά στον αντιδραστήρα ITER. Η μελέτη επικεντρώνεται στον εντοπισμό των ραδιενεργών ισοτόπων σε κάθε υλικό και στη μέτρηση των επιπέδων ενεργότητάς τους. Τα υπό έρευνα υλικά ακτινοβολήθηκαν στο JET το 2021 κατά τη διάρκεια λειτουργίας με πηγή πλάσματος Τριτίου-Τριτίου (T-T) και Δευτερίου-Τριτίου (D-T).

Οι μετρήσεις της ακτινοβολίας-γ πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο φασματοσκοπίας-γ του ΙΠΡΕΤΕΑ με χρήση ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου υψηλής απόδοσης (GEM80). Για τον ακριβή υπολογισμό της ενεργότητας, εφαρμόστηκαν στα αποτελέσματα των μετρήσεων κατάλληλοι συντελεστές διόρθωσης. Συγκεκριμένα, ο κώδικας MCNP5 χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης των ακτίνων-γ μέσα στον όγκο του κάθε δείγματος, ενώ το πρόγραμμα TrueCoinc χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Εκτός από την τιμή της ενεργότητας, χρησιμοποιώντας την τιμή της μάζας τους, υπολογίστηκε και η ειδική ενεργότητα των υλικών. Και για τις δυο ποσότητες έγινε αναγωγή χρονικά στο τέλος της περιόδου ακτινοβολήσης, ώστε να μπορεί να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των δειγμάτων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης αυτών των υλικών μέσα σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης, βοηθώντας στην αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων υλικών, όσο το δυνατόν χαμηλότερης ενεργοποίησης και με μηδενικές ή περιορισμένες ποσότητες μακρόβιων ισοτόπων, για μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης. Επιπλέον, τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας υπογραμμίζουν τη σημασία που έχει η ολοκληρωμένη μελέτη των φαινομένων και παραμέτρων που επηρεάζουν τη διαδικασία της γ-φασματοσκοπίας, ώστε να εξασφαλίζεται η ακριβής μέτρηση της ενεργότητας. Τα ευρήματα της έρευνας παρέχουν πολύτιμη πληροφορία, συμβάλλοντας στην πρόοδο της επιστήμης της πυρηνικής φυσικής και στην ανάπτυξη αξιόπιστων και βιώσιμων τεχνολογιών σύντηξης.

Λέξεις Κλειδιά: Υλικά σύντηξης, JET, ITER, φασματοσκοπία-γ, προσδιορισμός ενεργότητας, συντελεστές διόρθωσης.

Abstract

Aim of the present study is the radiological characterization of materials that are expected to be used as structural or functional components in the ITER fusion reactor. The study focuses on the identification of radioactive isotopes in each sample and the determination of their activity levels. The studied materials were irradiated in 2021 at the Joint European Torus (JET) in UK, during its operations with Tritium-Tritium (T-T) and Deuterium-Tritium (D-T) plasma.

Gamma spectrometry measurements were performed at the INRASTES spectrometry lab using a high purity germanium detector (GEM80). In order to achieve accurate activity determination, appropriate correction factors were applied on the spectrometry results to account for the effects of true-coincidence summing and self-attenuation of photons within the sample volume. In particular, the MCNP5 code was used to calculate the correction factor for self-absorption of photons, while the TrueCoinc program was used to provide true coincidence correction factors for all isotopes and energies of interest.

Based on the corrected spectrometry results, the total induced activity as well as the specific activity was determined for each sample. Both quantities were corrected for the decay and determined at the end of the irradiation, so that there could be a comparison between the different samples.

The results obtained contribute to the understanding of the radiological performance of these materials inside a fusion reactor, allowing the evaluation and selection of suitable materials (low activation and without long-lived isotopes) for future applications in the field of nuclear fusion. Moreover, they highlight the importance of accurate activity determination, taking into account all parameters and effects that influence gamma spectrometry measurements. Finally, the findings of this work provide valuable information, contributing to the advancement of nuclear physics science and the development of reliable and sustainable fusion energy technologies.

Keywords: Fusion materials, JET, ITER, gamma spectroscopy, activity determination, correction factors.

Κατάλογος Σχημάτων

1	Σχάση vs Σύντηξη	9
2	Ενέργεια Σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του Μαζικού Αριθμού .	10
3	Οι καταστάσεις της ύλης	10
4	Σχεδίαση Stellarator	11
5	Σχεδίαση Tokamak	12
6	Καύσιμο Αδρανειακού Περιορισμού	13
7	Γραφική απεικόνιση του αντιδραστήρα JET	16
8	Γραφική απεικόνιση του αντιδραστήρα ITER	17
9	Σχηματική αναπαράσταση της Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση .	19
10	Αλληλεπιδράσεις νετρονίων με την ύλη	20
11	Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη συναρτήσει της ενέργειάς τους . .	21
12	Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης για το Co-60	23
13	Θέση υλικών εντός του αντιδραστήρα ITER	25
14	Δειγματοφορέας ACT holder (πηγή: UKAEA)	25
15	Θέση ACT holder στο LTIS (πηγή: UKAEA)	26
16	Σταθμός Μακράς Ακτινοβολήσης (LTIS) (πηγή: UKAEA)	27
17	ACT holder μετά την ακτινοβολήση	27
18	Φωτογραφίες της πειραματικής διάταξης	30
19	Φάσμα Co-60 όπως απεικονίζεται στο Gamma Vision	30
20	Εικόνα από Gamma Vision	31
21	Καμπύλη βαθμονόμησης GEM80 για απόσταση 12cm	32
22	Φάσμα υλικού Eurofer	33

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	7
1.1	Σκοπός	7
1.2	Δομή της εργασίας	8
2	Θερμοπυρηνική Σύντηξη	9
2.1	Το περιβάλλον της σύντηξης	9
2.2	Ο αντιδραστήρας σύντηξης JET	16
2.3	Ο αντιδραστήρας σύντηξης ITER	17
3	Νετρονική Ενεργοποίηση	18
3.1	Τεχνική	18
3.2	Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη	19
3.3	Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη	20
4	Ακτινοβολημένα δείγματα	24
4.1	Δείγματα	24
4.2	Ακτινοβολήση των δειγμάτων	25
5	Μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας	29
5.1	Ανιχνευτική διάταξη	29
5.2	Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης	31
5.3	Πειραματικές Μετρήσεις	33
6	Ανάλυση	34
6.1	Πυρηνικές Αντιδράσεις	34
6.2	Υπολογισμός ενεργότητας και ειδικής ενεργότητας	35
6.3	Διάδοση σφαλμάτων και υπολογισμός αβεβαιότητας	37
7	Αποτελέσματα και συζήτηση	38
7.1	Συντελεστές διόρθωσης	38
7.2	Ενεργότητα	42
7.3	Συζήτηση	47
8	Συμπεράσματα	49
8.1	Προοπτικές	50
	Βιβλιογραφία	52
	Παραρτήματα	55

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός

Μέχρι το τέλος της τρέχουσας δεκαετίας, αναμένεται η ολοκλήρωση της κατασκευής και η έναρξη της λειτουργίας του μεγαλύτερου μέχρι στιγμής αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης, του αντιδραστήρα ITER. Σε μια εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρα, εξέχουσας σημασίας ζήτημα αποτελεί η ενεργοποίηση των υλικών από τα οποία αποτελείται ο αντιδραστήρας. Για λόγους ακτινοπροστασίας και ασφάλειας του ερευνητικού προσωπικού, αλλά και για λόγους διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων μετά το πέρας της λειτουργίας του αντιδραστήρα, είναι σημαντικό να μελετηθεί η επίδραση της ακτινοβολίας στα υλικά αυτά και να προσδιοριστούν τα επίπεδα ενεργότητάς τους μετά από την έκθεσή τους σε νετρόνια.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο ραδιολογικός χαρακτηρισμός υλικών που έχουν μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνολογία σύντηξης. Πρόκειται για υλικά που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ή θα χρησιμοποιηθούν ως δομικά ή/και λειτουργικά συστατικά στον αντιδραστήρα ITER και είναι γνωστά ως ITER materials. Τα υλικά αυτά έχουν κατασκευαστεί βάσει συγκεκριμένων προδιαγραφών για τη σύσταση και τις ιδιότητές τους, καθώς είναι επιθυμητή η χαμηλή ενεργοποίησή τους και η όσο το δυνατόν χαμηλότερη περιεκτικότητά τους σε προσμίξεις που μπορεί να οδηγήσουν σε ισότοπα με μεγάλο χρόνο ημιζωής. Μετά την ακτινοβόλησή τους στον αντιδραστήρα σύντηξης Joint European Torus (JET) που βρίσκεται στο Ηνωμένο Βασίλειο, τα δείγματα μετρήθηκαν σε κατάλληλες διατάξεις γ-φασματοσκοπίας.

Τα υπό μελέτη δείγματα παρασχέθηκαν στην Ομάδα Σύντηξης του ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ', στα πλαίσια της συμμετοχής της στο ερευνητικό έργο ACT (Activation measurements for ITER material & data validation - Μετρήσεις ενεργότητας για υλικά ITER και επικύρωση δεδομένων). Στόχος του συγκεκριμένου έργου είναι η εκτέλεση πειραμάτων για τη μελέτη των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των κύριων εξαρτημάτων στο εσωτερικό του tokamak του ITER, καθώς και για την επικύρωση κωδίκων και δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική ανάλυση του ITER.

Ανάμεσα στα διάφορα πειράματα που, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στο JET, ιδιαίτερης σημασίας είναι αυτά που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του με πηγή πλάσματος Δευτερίου-Τριτίου (D-T) (JET experimental campaign DTE2), καθώς επιτεύχθη ροή νετρονίων ενέργειας 14MeV , επομένως και ακτινοβόληση των δειγμάτων υπό ροή νετρονίων συγκρίσιμη με αυτή που θα υπάρχει στο ITER.

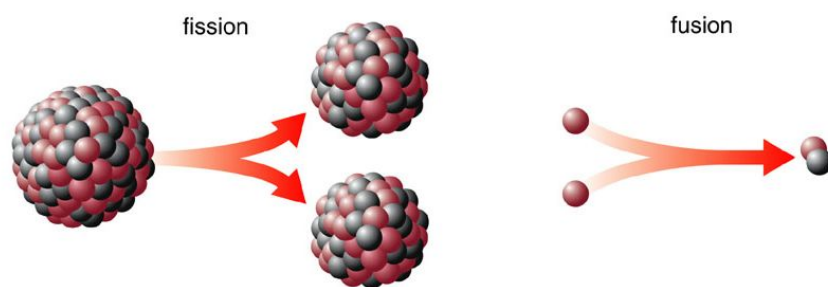
1.2 Δομή της εργασίας

Η εργασία είναι χωρισμένη σε οκτώ κεφάλαια. Μετά την παρουσίαση του σκοπού (Κεφάλαιο 1), ακολουθεί μια αναφορά στη θερμοπυρηνική σύντηξη (Κεφάλαιο 2), δίνοντας έμφαση στο περιβάλλον στο οποίο μπορεί να συμβεί, παρουσιάζοντας τις βασικότερες αντιδράσεις σύντηξης, καθώς και τα πλεονεκτήματα της παραγωγής ενέργειας από τη συγκεκριμένη πυρηνική αντίδραση. Άμεση σχέση με τα πειραματικά δείγματα της εργασίας έχουν οι αντιδραστήρες Joint European Torus (JET) και International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), στους οποίους γίνεται μια μικρή αναφορά σχετικά με τον σκοπό και τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της νετρονικής ενεργοποίησης (Κεφάλαιο 3) και στον τρόπο αλληλεπίδρασης των νετρονίων και των φωτονίων με την ύλη. Στα επόμενα κεφάλαια, περιγράφεται η διαδικασία ακτινοβόλησης των δειγμάτων στον αντιδραστήρα JET (Κεφάλαιο 4) και οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας, στο ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ' (Κεφάλαιο 5). Στο 6ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ενεργότητας των δειγμάτων και των αντίστοιχων σφαλμάτων. Αφού γίνει μια σύνοψη των τελικών αποτελεσμάτων και συζήτηση επ' αυτών (Κεφάλαιο 7), αναφέρονται κάποια συμπεράσματα και κάποιες προοπτικές της μελέτης (Κεφάλαιο 8). Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ορισμένα παραρτήματα που περιλαμβάνουν επιπλέον πληροφορία, την επεξήγηση των απαραίτητων μαθηματικών σχέσεων και τα πιστοποιητικά των πηγών.

2 Θερμοπυρηνική Σύντηξη

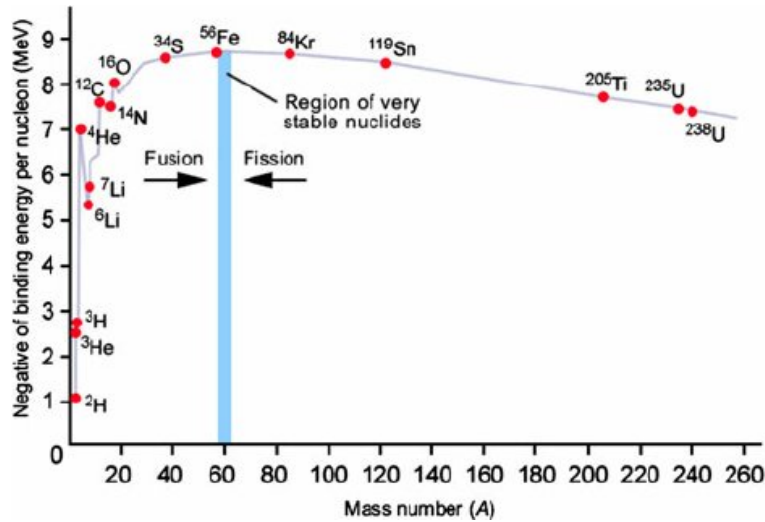
2.1 Το περιβάλλον της σύντηξης

Η θερμοπυρηνική σύντηξη είναι η βασική διεργασία παραγωγής ενέργειας στον ήλιο και στα άστρα, κυρίως με τη μετατροπή υδρογόνου σε ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο κάτω από πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ισχυρές πιέσεις μετατρέπεται από αέριο σε πλάσμα, στο οποίο τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται από τους θετικά φορτισμένους πυρήνες. Έτσι οι πυρήνες έρχονται σε πολύ κοντινή απόσταση, με αποτέλεσμα η ελκτική πυρηνική δύναμη να υπερνικά το φράγμα Coulomb της απωστικής ηλεκτροστατικής δύναμης και οι πυρήνες να συντήκονται απελευθερώνοντας σημαντικά ποσά ενέργειας. Ουσιαστικά, πρόκειται για την αντίθετη διαδικασία σε σχέση με την πυρηνική σχάση, κατά την οποία συμβαίνει διάσπαση ενός βαρέως ατομικού πυρήνα σε δύο θραύσματα περίπου ίσης μάζας, που συνοδεύεται από απελευθέρωση ενέργειας.



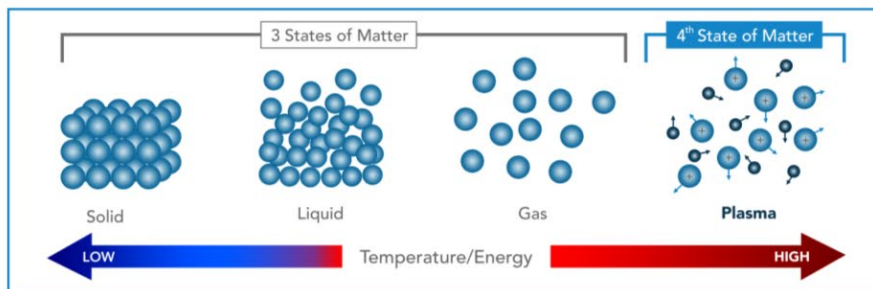
Σχήμα 1 – Σχάση vs Σύντηξη [1]

Οι δυο αυτές πυρηνικές διαδικασίες, έχουν στόχο την δημιουργία πυρήνων που παρουσιάζουν μέγιστη σταθερότητα στην περιοχή γύρω από τον μαζικό αριθμό $A=60$, όπως αναδεικνύει και το Σχήμα 2. Ακολουθώντας αντίθετες διαδρομές στο γράφημα, στη σχάση ένας βαρύς πυρήνας χωρίζεται δημιουργώντας θραύσματα με μαζικούς αριθμούς γύρω από το $A=60$, ενώ αντίθετα, στη σύντηξη, ελαφρύτεροι πυρήνες, συνδυάζονται για να σχηματίσουν έναν βαρύτερο πυρήνα. Τόσο η διεργασία της σχάσης όσο και αυτή της σύντηξης στοχεύουν στη δημιουργία πυρήνων με τη μέγιστη σταθερότητα, συμβάλλοντας σε πιο ενεργειακά ευνοϊκές αντιδράσεις και υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις [2].



Σχήμα 2 – Ενέργεια Σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει του Μαζικού Αριθμού [3]

Στη Γη, η επίτευξη συνθηκών σύντηξης είναι ένα δύσκολο εγχείρημα. Η έλλειψη των τεράστιων βαρυτικών δυνάμεων που δημιουργούν στα αστέρια τις κατάλληλες συνθήκες σύντηξης, πρέπει να αντικατασταθεί με θερμοκρασίες της τάξης των εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου. Σε αυτές τις θερμοκρασίες και υπό σταθερή πίεση, τα ισότοπα του υδρογόνου μεταβαίνουν σε κατάσταση πλάσματος, την αποκαλούμενη και ‘τέταρτη κατάσταση της ύλης’, δηλαδή ένα μίγμα θετικά και αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων (Σχήμα 3).



Σχήμα 3 – Οι καταστάσεις της ύλης [4]

Στα πειράματα και τις διατάξεις πυρηνικής σύντηξης, σημαντικό ρόλο έχει η δημιουργία και η συγκράτηση του πλάσματος. Με βάση το κριτήριο Lawson [2], για να επιτευχθεί καθαρό ενεργειακό ‘κέρδος’ σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης, θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:

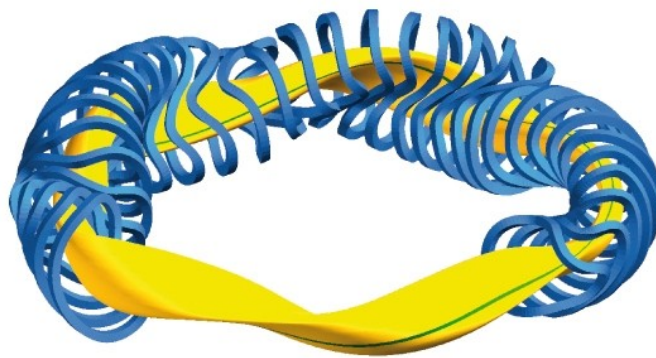
$$n \times \tau \geq 10^{20} s/m^3 \quad (1)$$

Η σχέση (1) παρουσιάζει το ελάχιστο αναγκαίο γινόμενο της πυκνότητας ιόντων (n) και του χρόνου περιορισμού του πλάσματος (τ). Όσο υψηλότερη η πυκνότητα πλάσματος ή η διάρκεια διατήρησής του σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία χωρίς μεγάλες απώλειες ενέργειας, τόσο πιο πιθανό είναι το ενδεχόμενο να συμβούν αντιδράσεις σύντηξης μεταξύ των σωματιδίων του καυσίμου. Το κριτήριο Lawson χρησιμεύει ως κατευθυντήρια γραμμή για τους ερευνητές και τους μηχανικούς σύντηξης για τη δημιουργία αποτελεσματικών αντιδραστήρων, ικανών να παράξουν καθαρό πλεόνασμα ενέργειας.

Οι δυο κυριότερες μέθοδοι περιορισμού του πλάσματος σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα είναι ο μαγνητικός και ο αδρανειακός περιορισμός.

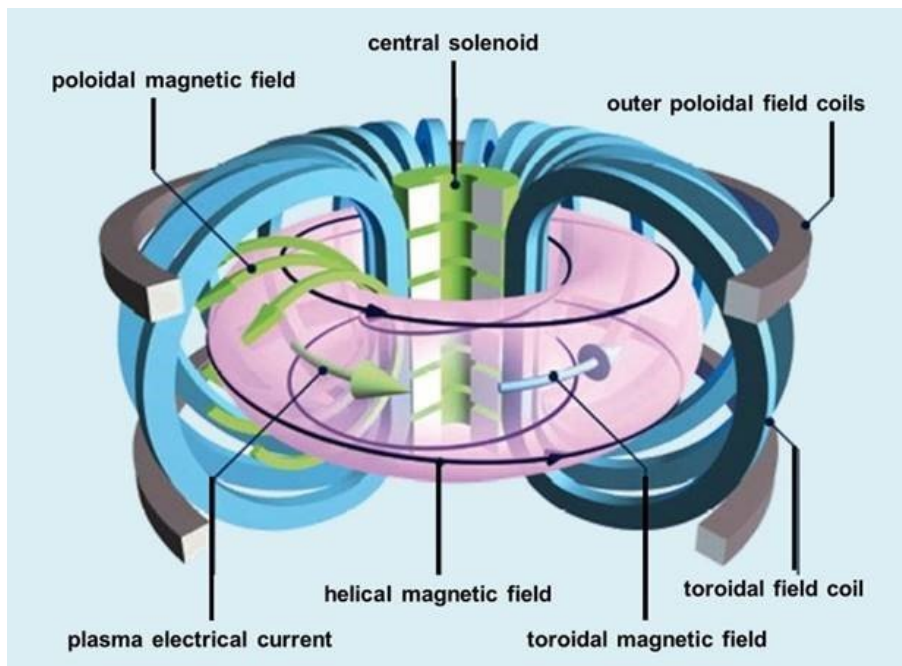
Στον μαγνητικό περιορισμό, γίνεται χρήση ισχυρών μαγνητικών πεδίων για τον περιορισμό του πλάσματος. Ο βασικός στόχος είναι η αποφυγή της επαφής του πλάσματος με τα τοιχώματα του αντιδραστήρα, κάτι που θα μπορούσε να επιφέρει απώλεια θερμότητας και αποσταθεροποίησή του. Η πιο αποτελεσματική γεωμετρία είναι η τοροειδής (toroidal), σε σχήμα ντόνατ, στην οποία δημιουργείται μαγνητικό πεδίο με δυναμικές γραμμές που ακολουθούν σπειροειδή τροχιά ώστε να περιοριστεί το πλάσμα. Οι δυο βασικότερες μορφές αντιδραστήρων τέτοιου τύπου είναι τα stellarators και τα tokamaks.

Το stellarator επινοήθηκε από τον Lyman Spitzer το 1951, στο Εργαστήριο Φυσικής Πλάσματος του Princeton. Χρησιμοποιώντας μια αρκετά σύνθετη γεωμετρία στριμμένων πηνίων, οι μαγνητικές γραμμές παράγονται από μια σειρά πηνίων με ελικοειδές σχήμα (Σχήμα 4). Τα stellarators προσφέρουν υψηλή σταθερότητα πλάσματος και παρέχουν τη δυνατότητα για σταθερή και συνεχή λειτουργία, αλλά η περίπλοκη φυσική τους διαμόρφωση καθιστά την κατασκευή τους αρκετά δύσκολη. Σημείο αναφοράς αποτελεί ο αντιδραστήρας Wendelstein 7-X που βρίσκεται στο Ινστιτούτο Max Planck, στη Γερμανία [5].



Σχήμα 4 – Σχεδίαση Stellarator [6]

Το tokamak (toroidalnya kamera ee magnetnaya katushka – μαγνητικός θάλαμος σε σχήμα τόρου) σχεδιάστηκε το 1951 από τους Σοβιετικούς φυσικούς Andrei Sakharov και Igor Tamm. Σε ένα tokamak, το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από έναν κατάλληλο συνδυασμό μιας σειράς πηνίων ομοιόμορφα τοποθετημένων γύρω από τον αντιδραστήρα σε σχήμα δακτυλίου και από ένα σύστημα οριζόντιων πηνίων έξω από αυτόν, ενώ στο κέντρο βρίσκεται μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα (Σχήμα 5). Μικρές διαταραχές στη λειτουργία τους μπορούν να δημιουργήσουν απώλειες ενεργειακού περιορισμού, προκαλώντας μεγάλες θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις στη δομή και στα τοιχώματα του αντιδραστήρα. Υπήρξαν πρώιμες δυσκολίες με τον σχεδιασμό τους, όταν τα πειράματα έδειξαν ότι τα ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, καθώς κινούνταν κατά μήκος των γραμμών του μαγνητικού πεδίου, παρασέρνονταν κατακόρυφα χτυπώντας στους τοίχους και τελικά χάνονταν. Αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε με την διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στο πλάσμα, δημιουργώντας ένα πρόσθετο μαγνητικό πεδίο κάθετο στο ρεύμα. Ως αποτέλεσμα, τα σωματίδια κινούνται σε μια τρισδιάστατη καμπύλη παραμένοντας μέσα στον δακτύλιο. Η σχεδίαση tokamak κυριαρχεί στον κόσμο της σύντηξης, αφού θεωρείται το πιο πολλά υποσχόμενο σχέδιο και η έρευνα συνεχίζεται σε διάφορα tokamaks σε όλο τον κόσμο [5].



Σχήμα 5 – Σχεδίαση Tokamak [7]

Στις διατάξεις σύντηξης αδρανειακού περιορισμού, δέσμες λέιζερ ή ιόντων εστιάζονται με μεγάλη ακρίβεια σε ένα μικρό σφαιρίδιο διαμέτρου λίγων χιλιοστών, που περιέχει καύσιμο σύντηξης (Σχήμα 6), τυπικά ένα μείγμα Δευτερίου και Τριτίου. Η ενέργεια που προσφέρεται στο σφαιρίδιο, οδηγεί το καύσιμο σε ακραίες θερμοκρασίες και πιέσεις, πυροδοτώντας αντιδράσεις σύντηξης. Συγκεκριμένα, το εξωτερικό στρώμα του υλικού εκρήγνυται δημιουργώντας ένα μέτωπο συμπίεσης που κινείται προς τον πυρήνα του καυσίμου, ο οποίος μπορεί να συμπιεστεί σε χίλιες φορές την πυκνότητά του σε υγρή μορφή, με αποτέλεσμα να προκύψουν συνθήκες σύντηξης. Η ενέργεια που απελευθερώνεται θερμαίνει το περιβάλλον καύσιμο, το οποίο μπορεί επίσης να υποστεί σύντηξη που οδηγεί σε αλυσιδωτή αντίδραση, γνωστή ως ανάφλεξη (ignition). Τα πειράματα αδρανειακού περιορισμού στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των τεχνικών έκρηξης και στη μελέτη της συμπεριφοράς του πλάσματος υπό ακραίες συνθήκες, με στόχο την επίτευξη αυτοσυντηρούμενων αντιδράσεων σύντηξης για παραγωγή ενέργειας.

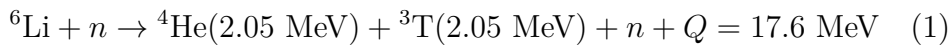
Το National Ignition Facility (NIF) στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ είναι μια μεγάλη ερευνητική συσκευή σύντηξης αδρανειακού περιορισμού που βασίζεται σε λέιζερ. Εστιάζει 192 ισχυρές ακτίνες λέιζερ σε έναν μικρό στόχο σε λίγα δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου, παρέχοντας πάνω από $2MJ$ ενέργειας και $500TW$ μέγιστης ισχύος [5].



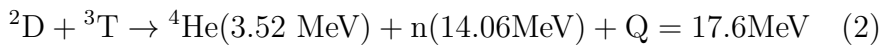
Σχήμα 6 – Καύσιμο Αδρανειακού Περιορισμού [8]

2.1.1 Βασικές αντιδράσεις

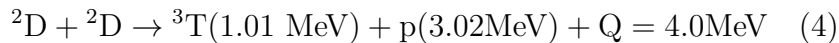
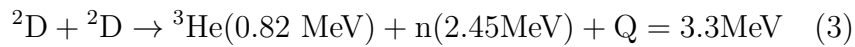
Οι αντιδράσεις σύντηξης, βασίζονται κυρίως σε δυο ισότοπα του υδρογόνου (1H), το Δευτέριο (2H ή 2D) και το Τρίτιο (3H ή 3T). Το Δευτέριο αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο, ενώ το Τρίτιο από ένα πρωτόνιο και δυο νετρόνια. Το Δευτέριο συναντάται στο θαλασσινό νερό σε αναλογία $30g/m^3$, συνεπώς είναι πρακτικά άφθονο, ενώ το Τρίτιο είναι ραδιενεργό και μπορεί να παραχθεί μέσω του βομβαρδισμού λιθίου (6Li) με νετρόνια (n), δηλαδή μέσω της αντίδρασης:



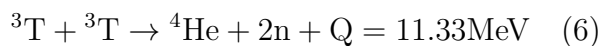
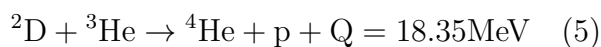
Σε έναν αντιδραστήρα ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης, η αντίδραση που προτιμάται είναι αυτή μεταξύ του Δευτερίου και του Τριτίου (D-T), εξαιτίας της μεγάλης απελευθέρωσης ενέργειας, καθώς και λόγω της υψηλότερης ενεργού διατομής σε σχέση με τις υπόλοιπες αντιδράσεις.



Συχνά χρησιμοποιούνται επίσης οι αντιδράσεις Δευτερίου-Δευτερίου (D-D), οι οποίες όμως απελευθερώνουν σημαντικά λιγότερη ενέργεια και έχουν περίπου 100 φορές μικρότερη ενεργό διατομή σε σχέση με τις αντιδράσεις Δευτερίου-Τριτίου (D-T).



Αξίζει να αναφερθούν και δυο λιγότερο πιθανές αντιδράσεις που είναι οι (D-He) και (T-T).



2.1.2 Τα πλεονεκτήματα και η αναγκαιότητα της σύντηξης

Η πυρηνική σύντηξη μπορεί να έχει πολλά πλεονεκτήματα ως πιθανή πηγή ενέργειας. Αρχικά, στο κομμάτι της ενεργειακής απόδοσης, οι αντιδράσεις σύντηξης απελευθερώνουν σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε σχέση με άλλες πηγές όπως τα ορυκτά καύσιμα ή η πυρηνική σχάση. Εκτός αυτού, ένας αντιδραστήρας σύντηξης, δεν θα επιβάρυνε το περιβάλλον προκαλώντας επιπλέον ατμοσφαιρική ρύπανση, καθώς δεν εκπέμπονται αέρια του θερμοκηπίου, ενώ τα ραδιενεργά απόβλητα, με κύριο το Τρίτιο, έχουν πολύ μικρότερο χρόνο ημιζωής σε σχέση με τα αντίστοιχα της πυρηνικής σχάσης, καθιστώντας ευκολότερη τη διαχείρισή τους.

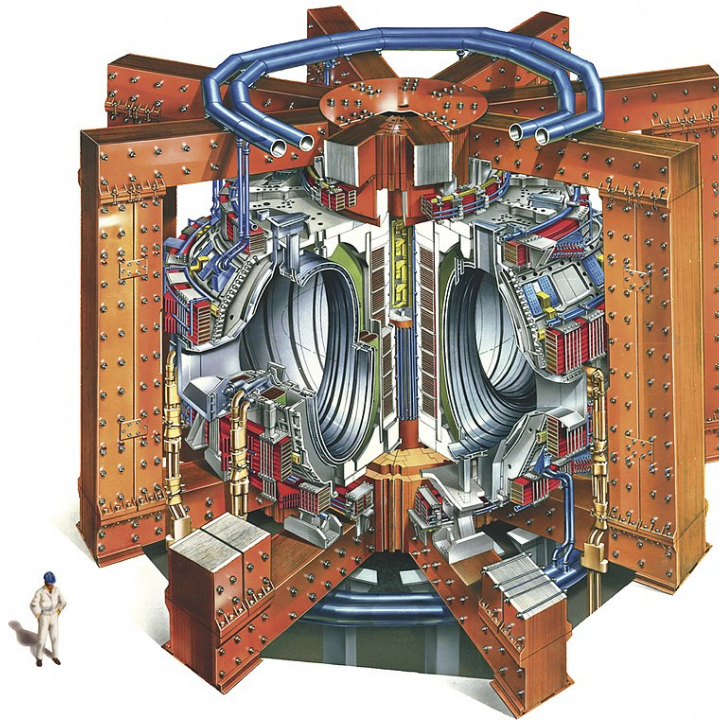
Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη σύντηξη βρίσκονται πρακτικά σε αφθονία στη Γη, αφού το Δευτέριο συναντάται στο θαλασσινό νερό, ενώ το Τρίτιο μπορεί να παραχθεί από το λίθιο, που είναι άφθονο στο έδαφος. Επίσης, ένας αντιδραστήρας σύντηξης έχει μειωμένο κίνδυνο δημιουργίας καταστροφικού πυρηνικού ατυχήματος λόγω ανεξέλεγκτων αντιδράσεων, αφού οι αντιδράσεις σύντηξης απαιτούν ακριβείς συνθήκες για τη λειτουργία τους και αν οι συνθήκες διαταραχθούν, η αντίδραση σταματά και ο αντιδραστήρας 'σβήνει'.

Παρά τις σημαντικές τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για την επίτευξη πρακτικής ενέργειας σύντηξης, αυτά τα πλεονεκτήματα την καθιστούν ως μια εξαιρετικά επιθυμητή και πολλά υποσχόμενη πηγή ενέργειας για το μέλλον, που θα μπορούσε να φέρει επανάσταση στον τομέα της ενέργειας.

Πράγματι, η κατασκευή μονάδων παραγωγής ενέργειας μέσω πυρηνικής σύντηξης μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ανθρωπότητα, τόσο από την άποψη της ενεργειακής ασφάλειας σε συνδυασμό με τη βιωσιμότητα και τις ανάγκες του διαρκώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού, όσο και από την άποψη της καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής με τη σημαντική μείωση των αποτυπωμάτων άνθρακα στην ατμόσφαιρα [9].

2.2 Ο αντιδραστήρας σύντηξης JET

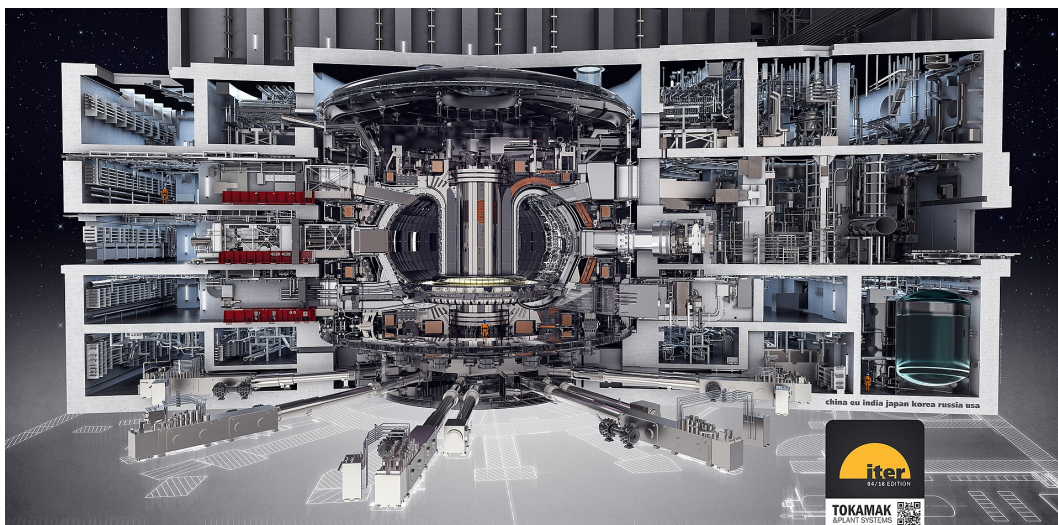
Ο αντιδραστήρας Joint European Torus, εν συντομία JET, αποτελεί το μεγαλύτερο πείραμα μαγνητικού περιορισμού πλάσματος και ένα από τα πρώτα και βασικότερα βήματα προς τη δημιουργία ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας μέσω πυρηνικής σύντηξης. Είναι σε λειτουργία από το 1983, στην Οξφόρδη του Ηνωμένου Βασιλείου και έχει συμβάλει σημαντικά στην πρόοδο και την κατανόηση της συμπεριφοράς του πλάσματος σε συνθήκες παραπλήσιες με αυτές που θα υπάρχουν σε έναν πυρηνικό σταθμό σύντηξης. Το JET είναι το μεγαλύτερο tokamak στον κόσμο και κατά τη λειτουργία του χρησιμοποιείται ως καύσιμο Δευτέριο (D) και Τρίτιο (T) αξιοποιώντας κυρίως τις αντιδράσεις D-D & D-T (βλ. ενότητα 2.1.1), ενώ έχει γίνει και το μοναδικό, μέχρι σήμερα, πείραμα με αντιδράσεις Τριτίου-Τριτίου (T-T) [10].



Σχήμα 7 – Γραφική απεικόνιση του αντιδραστήρα JET [11]

2.3 Ο αντιδραστήρας σύντηξης ITER

Ο αντιδραστήρας International Thermonuclear Experimental Reactor, εν συντομία ITER (στα λατινικά σημαίνει ‘ο δρόμος’ ή ‘το μονοπάτι’), αποτελεί το επόμενο βήμα προς την κατασκευή ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της πυρηνικής σύντηξης. Βρίσκεται υπό κατασκευή στο Cadarache της νότιας Γαλλίας και -μετά την ολοκλήρωσή του- αναμένεται να είναι ο μεγαλύτερος και ισχυρότερος αντιδραστήρας σύντηξης που έχει λειτουργήσει μέχρι σήμερα. Οι στόχοι του ITER είναι η διατήρηση των συνθηκών σύντηξης με πλάσμα Δευτερίου-Τριτίου D-T, η παραγωγή 500MW ισχύος σύντηξης εντός του πλάσματος, επιτυγχάνοντας δεκαπλάσια απόδοση ισχύος με ισχύ θέρμανσης εισόδου 50MW, η παραγωγή Τριτίου (tritium breeding) και τελικά η επίδειξη ολοκληρωμένης λειτουργίας των διαφόρων τεχνολογιών που απαιτούνται για μια μονάδα παραγωγής ενέργειας σύντηξης, καθώς και η διασφάλιση της ασφάλειας της συσκευής σύντηξης, με έμφαση στην επίδειξη ελέγχου στις αντιδράσεις σύντηξης με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [12].



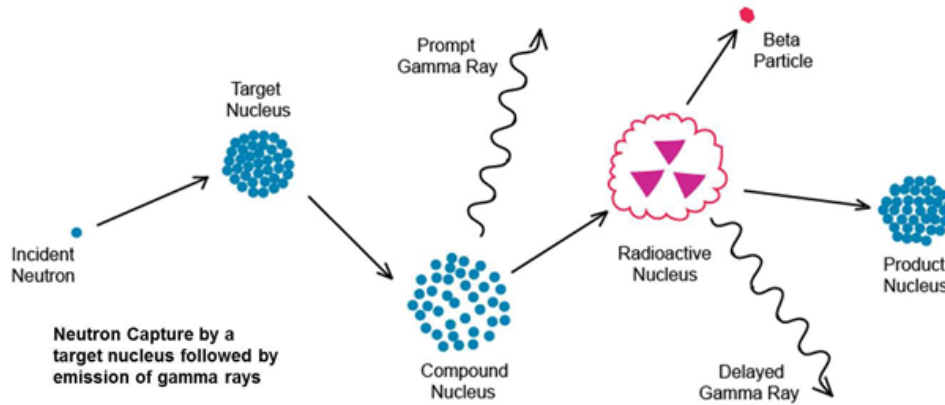
Σχήμα 8 – Γραφική απεικόνιση του αντιδραστήρα ITER [13]

3 Νετρονική Ενεργοποίηση

3.1 Τεχνική

Η Ανάλυση με Νετρονική Ενεργοποίηση (ANE) είναι μια μέθοδος για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των στοιχείων ενός δείγματος. Βασίζεται στη μέτρηση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας- γ που εκπέμπεται από τους ραδιενεργούς πυρήνες που σχηματίζονται μετά την ακτινοβόληση των υπό μελέτη δειγμάτων με νετρόνια. Οι διεγερμένοι πυρήνες αποδιεγείρονται εκπέμποντας χαρακτηριστικές ακτίνες- γ , οι οποίες μπορούν να ανιχνευθούν και να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των στοιχείων που υπάρχουν στο δείγμα. Η ταυτοποίηση των ραδιενεργών ισotόπων του δείγματος γίνεται μέσω της ανάλυσης των φασμάτων που λαμβάνονται με χρήση κατάλληλων ανιχνευτικών διατάξεων.

Η ANE μελετήθηκε από τον βραβευμένο με Νόμπελ George de Hevesy (1885-1966), ενώ εργαζόταν με τη Hilde Levi (1909-2003) στο Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής Niels Bohr, στην Κοπεγχάγη και δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1936. Στη διαδικασία της ANE, το δείγμα τοποθετείται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα ή οποιοδήποτε άλλο πεδίο νετρονίων και βομβαρδίζεται με νετρόνια. Τα νετρόνια συλλαμβάνονται από στοιχεία του δείγματος με αποτέλεσμα την παραγωγή ασταθών ραδιενεργών ισotόπων (ραδιονουκλίδια). Πιο συγκεκριμένα, τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα-στόχο μέσω μιας μη ελαστικής σύγκρουσης και σχηματίζεται ένας σύνθετος πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση. Η ενέργεια διέγερσης του σύνθετου πυρήνα χάνεται σχεδόν ακαριαία, καθώς αποδιεγείρεται σε μια πιο σταθερή κατάσταση, μέσω εκπομπής μιας ή περισσότερων χαρακτηριστικών ακτίνων- γ . Το δείγμα τοποθετείται σε κατάλληλη ανιχνευτική διάταξη, συνήθως βασισμένη σε ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας, που καταγράφει τις ακτίνες- γ που εκπέμπονται. Οι ενέργειες αυτών των ακτίνων- γ είναι συγκεκριμένες για ένα δεδομένο ραδιενεργό ισotόπο, συνεπώς μέσω αυτών ταυτοποιούνται τα ισotόπα του δείγματος και προσδιορίζεται ποιοτικά η σύστασή του. Από τον αριθμό των ακτίνων- γ που καταγράφονται ως χρούσεις στην ανιχνευτική διάταξη μπορεί να προσδιοριστεί και η ποσοτική σύσταση του δείγματος [14-16].

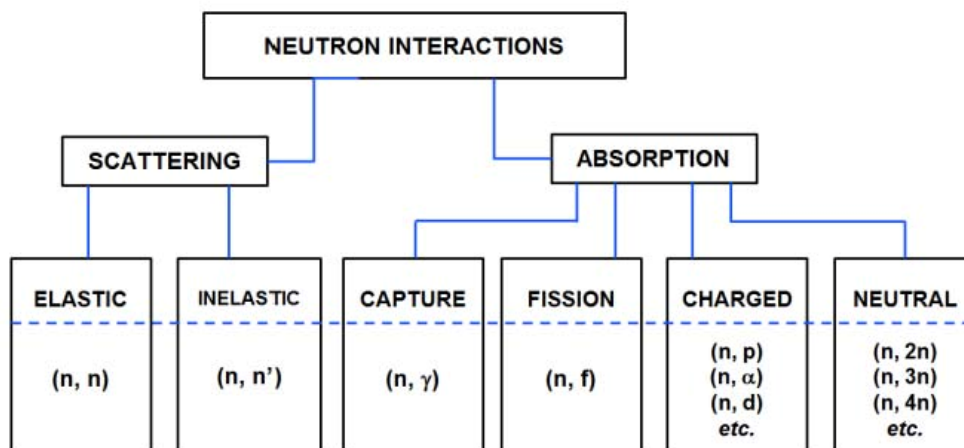


Σχήμα 9 – Σχηματική αναπαράσταση της Ανάλυσης με Νετρονική Ενεργοποίηση [17]

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω έχει μη καταστροφικό χαρακτήρα, επιτρέποντας την ανάλυση των υπό μελέτη δειγμάτων ως έχουν, χωρίς να αλλοιωθεί η σύστασή τους, λόγω της διεισδυτικής φύσης των προσπίπτοντων νετρονίων και των ακτίνων-γ που προκύπτουν. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αρχαιολογίας, της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς, της εγχειματολογίας και της επιστήμης των υλικών.

3.2 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

Τα νετρόνια είναι υποατομικά σωματίδια που δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, καθιστώντας τα ηλεκτρικά ουδέτερα, ενώ έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη μάζα από τα πρωτόνια. Οι ιδιότητές τους και οι αλληλεπιδράσεις τους με τους ατομικούς πυρήνες τα καθιστούν ανεκτίμητα για τη μελέτη της δομής της ύλης, τη διερεύνηση των πυρηνικών αντιδράσεων και την κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών κάτω από ακραίες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω σκέδασης, ελαστικής ή ανελαστικής, αλλά και μέσω απορρόφησης, που μπορεί να προκαλέσει εκπομπή φωτονίου, πρωτονίου, σωματιδίου άλφα ή ακόμα και σχάση σε βαρείς πυρήνες.



Σχήμα 10 – Αλληλεπιδράσεις νετρονίων με την ύλη [18]

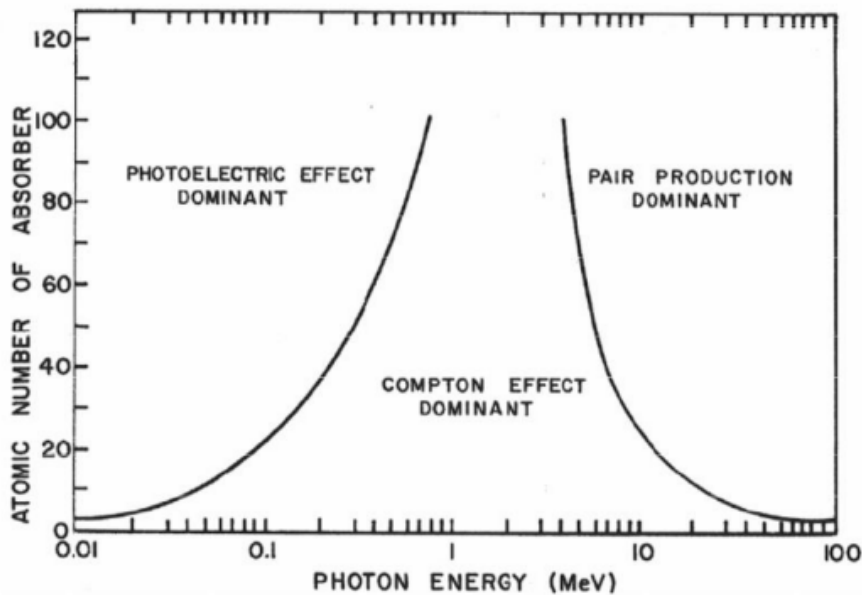
Στο σημείο αυτό, μπορεί να οριστεί η έννοια της ενεργού διατομής. Η ενεργός διατομή ορίζεται ως η πιθανότητα να συμβεί ένα συγκεκριμένο συμβάν μεταξύ ενός νετρονίου και ενός πυρήνα. Η μικροσκοπική ενεργός διατομή (σ) εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια συγκεκριμένη αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μεμονωμένου σωματιδίου ή ακτινοβολίας και ενός μεμονωμένου πυρήνα στόχου, ενώ η μακροσκοπική ενεργός διατομή (Σ) εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί μια συγκεκριμένη αλληλεπίδραση μέσα σε έναν μακροσκοπικό όγκο ή δείγμα.

3.3 Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

Τα φωτόνια είναι τα θεμελιώδη σωματίδια της μετάδοσης του φωτός και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στο κενό κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, ενώ μέσα σε υλικά η ταχύτητά τους αλλάζει ανάλογα με τη φύση του υλικού. Το φωτόνιο έχει διττό χαρακτήρα, μπορεί να συμπεριφέρεται είτε ως κύμα (π.χ. σε πειράματα συμβολής και περίθλασης) είτε ως σωματίδιο (π.χ. στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Οι βασικές αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με την ύλη είναι οι εξής (Σχήμα 11):

- i. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: Ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα ατομικό ηλεκτρόνιο, κάτι που οδηγεί σε ιονισμό και απελευθέρωση του ηλεκτρονίου από το άτομο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί μόνο αν το φωτόνιο έχει αρκετή ενέργεια για να υπερνικήσει την ενέργεια σύνδεσης και να αφαιρέσει το ηλεκτρόνιο από το άτομο. Η ενέργεια του απελευθερωμένου ηλεκτρονίου είναι η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του φωτονίου και της ενέργειας σύνδεσης του ηλεκτρονίου με το άτομο.

- ii. Σκέδαση Compton: Η σκέδαση Compton συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας αλληλεπιδρά με ένα χαλαρά δεσμευμένο ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα άτομο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το φωτόνιο υφίσταται αλλαγή κατεύθυνσης και μεταφέρει μέρος της ενέργειάς του στο ηλεκτρόνιο.
- iii. Δίδυμη γένεση: Τα φωτόνια υψηλής ενέργειας, όπως οι ακτίνες-γ, μπορούν να μετατρέψουν την ενέργειά τους σε ύλη παράγοντας ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου στην περιοχή ενός ατομικού πυρήνα. Για να παραχθεί το ζεύγος, το φωτόνιο πρέπει να έχει ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από 1.022 MeV, δηλαδή διπλάσια από την ενέργεια ηρεμίας του ζεύγους σωματιδίου-αντισωματιδίου. Για να διατηρηθεί η ορμή του συστήματος, το ζεύγος εκπέμπεται συνήθως σε αντίθετες κατευθύνσεις [19].



Σχήμα 11 – Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη συναρτήσει της ενέργειάς τους [20]

Εκτός των τριών βασικών αλληλεπιδράσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω της σκέδασης Rayleigh και της σκέδασης Thomson, στις οποίες θα γίνει μια ξεχωριστή σύντομη αναφορά, αφού δεν αξιοποιούνται στη γ-φασματοσκοπία.

Η σκέδαση Rayleigh αποτελεί μια διαδικασία ελαστικής σκέδασης, στην οποία τα φωτόνια διασκορπίζονται προς όλες τις κατευθύνσεις, όταν συγκρουστούν με σωματίδια ή δομές μικρότερες από το μήκος κύματος του φωτός.

Η σκέδαση Thomson, γνωστή και ως κλασική σκέδαση ή ελαστική σκέδαση φωτός, αναφέρεται στην αλληλεπίδραση φωτονίων με φορτισμένα σωματίδια, συνήθως ηλεκτρόνια, στην οποία τα φωτόνια αλλάζουν κατεύθυνση, χωρίς σημαντική αλλαγή στην ενέργειά τους.

3.3.1 Αυτοαπορρόφηση ακτίνων-γ

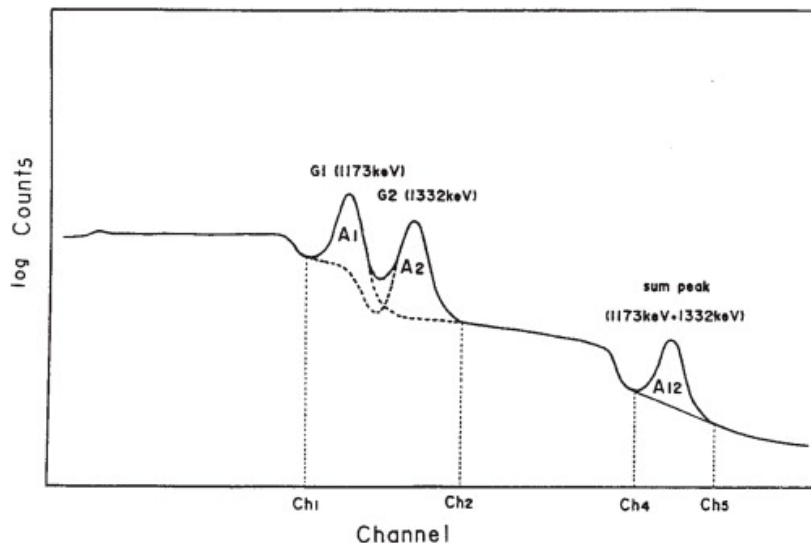
Στη γ-φασματοσκοπία, όταν μελετώνται δείγματα όγκου, μια σημαντική διόρθωση που πρέπει να εφαρμοστεί είναι αυτή για την εξασθένηση των φωτονίων μέσα στο ίδιο το υλικό του δείγματος, γνωστή ως διόρθωση αυτοαπορρόφησης ακτίνων-γ (gamma self attenuation correction). Η αυτοαπορρόφηση αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο η εκπεμπόμενη ακτινοβολία από ένα ραδιενεργό δείγμα ή πηγή εξασθενεί ή απορροφάται μέσα στον όγκο του δείγματος ή της πηγής, κάτι που συμβαίνει λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των φωτονίων και των ατόμων ή μορίων του υλικού του δείγματος. Η πυκνότητα του δείγματος είναι καθοριστικός παράγοντας στο φαινόμενο αυτό, αφού μεγαλύτερη πυκνότητα υλικού σημαίνει περισσότερες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων άρα και μεγαλύτερη απορρόφησή τους μέσα στο υλικό. Επίσης, το φαινόμενο είναι πιο έντονο για τα φωτόνια χαμηλότερων ενεργειών καθώς αυτά είναι πιθανότερο να χάσουν μέσα στον όγκο του υλικού όλη την ενέργειά τους και να απορροφηθούν σε σύγκριση με φωτόνια υψηλότερων ενεργειών. Πρακτικά, η αυτοαπορρόφηση επηρεάζει τις μετρήσεις και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της μετρούμενης ενεργότητας, αν δεν ληφθεί υπόψιν. Για τη διόρθωση των επιπτώσεων του συγκεκριμένου φαινομένου, χρειάζεται να εφαρμοστεί κατάλληλος συντελεστής διόρθωσης, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί μέσω προσομοίωσης Monte Carlo, όπως και έγινε στην παρούσα εργασία.

3.3.2 Φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, θα ήταν σκόπιμο να αναλυθεί το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, που αφορά ισότοπα που εκπέμπουν φωτόνια σε σειρά. Το συγκεκριμένο φαινόμενο εμφανίζεται όταν δύο ή περισσότερα φωτόνια εκπέμπονται σε σειρά από την ίδια διάσπαση ενός ραδιενεργού νουκλιδίου και ανιχνεύονται 'ταυτόχρονα', δηλαδή εντός του χρόνου απόκρισης του ανιχνευτή.

Ο χρόνος μεταξύ της εκπομπής των φωτονίων εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής των διεγερμένων καταστάσεων στον θυγατρικό πυρήνα και είναι συνήθως πολύ μικρότερος από τον χρόνο απόκρισης για έναν ανιχνευτή, που είναι της τάξης των μικροδευτερόλεπτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ανιχνευτής να μην μπορεί να διακρίνει μεταξύ της ανίχνευσης ενός ή περισσότερων φωτονίων, να τα 'βλέπει' ως ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με το άθροισμα των ενεργειών των ξεχωριστών φωτονίων, επομένως να το καταγράφει σε ένα κανάλι υψηλότερης ενέργειας στο φάσμα.

Στο Σχήμα 12 φαίνονται οι δυο εκφάνσεις του συγκεκριμένου φαινομένου για την περίπτωση του ^{60}Co . Τα δύο φωτόνια (ενέργειας 1173 keV & 1332 keV) που εκπέμπονται σε σειρά από το ^{60}Co εναποθέτουν πλήρως την ενέργειά τους στον ανιχνευτή ταυτόχρονα, δημιουργώντας μια νέα κορυφή στο κανάλι που αντιστοιχεί στο άθροισμα των ενεργειών τους (summing in), η οποία δεν αποτελεί 'πραγματική' κορυφή του συγκεκριμένου ισότοπου, με την έννοια ότι δεν αντιστοιχεί σε ακτίνα-γ που εκπέμπεται από αυτό. Την ίδια στιγμή, παρατηρείται 'μείωση' του εμβαδού των φωτοκορυφών στα 1173 keV και στα 1332 keV (summing out), καθώς τα αντίστοιχα φωτόνια δεν καταγράφηκαν εκεί αλλά στην αθροιστική κορυφή, στα 2505 keV [21].



Σχήμα 12 – Φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης για το Co-60 [22]

Για την διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, μέσω των οποίων εκτιμάται η έντασή του για κάθε ισότοπο και μελετούμενη γεωμετρία και υπολογίζονται κατάλληλοι συντελεστές διόρθωσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα TrueCoinc.

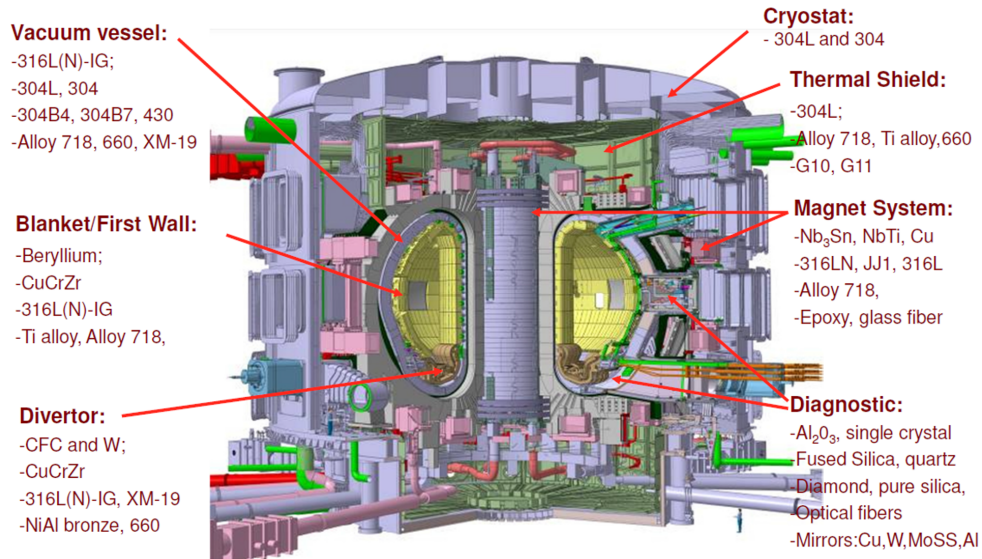
4 Ακτινοβολημένα δείγματα

4.1 Δείγματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν 21 δείγματα, όλα τους μεταλλικά ελάσματα (foils) σε σχήμα δίσκου με ακτίνα $0.9cm$ και πάχος $0.5mm$. Στα δείγματα αυτά περιλαμβάνονταν 17 δείγματα από υλικά που χρησιμοποιούνται στο ITER (ITER materials) καθώς και 4 δοσιμετρικά foils (δυο νικελίου (Ni) και δυο κοβαλτίου (Co) γνωστής σύστασης, που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της ροής των νετρονίων κατά την ακτινοβόληση. Τα δείγματα που μελετήθηκαν αναγράφονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί, μαζί με την τιμή της μάζας και της πυκνότητάς τους, ενώ στο Σχήμα 13 φαίνεται σε ποια σημεία ή εξαρτήματα του αντιδραστήρα ITER πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το κάθε υλικό.

Δείγμα	Υλικό	Μάζα [g]	Πυκνότητα [g/cm^3]
Co #1	Co Dosimetry foil	1.1090	8.90
Co #2	Co Dosimetry foil	1.0150	8.90
Ni #1	Ni Dosimetry foil	1.1297	8.90
Ni #2	Ni Dosimetry foil	1.1312	8.90
ITER #1	SS316L(N)-VV plate (Industeel)	0.9224	7.95
ITER #2	SS316L(N)-VV plate (R. Kind)	0.9260	7.95
ITER #3	SS316L(N)-VV plate (Thyssen)	0.9254	7.95
ITER #4	SS316L(N)-TF radial plate 2500/64	0.8792	7.95
ITER #5	SS316L(N)-TF radial plate 2500/68	0.8895	7.95
ITER #6	SS316L(N)-TF radial plate 2501/33	0.5081	7.95
ITER #10	Divertor Alloy 660	0.9214	7.95
ITER #11	Divertor Alloy 660	0.9186	7.95
ITER #14	Divertor W monoblock	0.7086	19.11
ITER #15	Divertor W monoblock	0.7068	19.11
ITER #16	Divertor XM-19	0.9111	7.88
ITER #18	Inconel 718	0.9633	8.17
ITER #19	Eurofer 97-3	0.3568	7.80
ITER #23	In-wall shield SS304L	0.9247	7.95
ITER #24	In-wall shield SS304L	0.9132	7.95
ITER #25	PF Jacket SS316L	0.8896	7.95
ITER #27	Divertor Nadege SS316L	0.9206	7.95

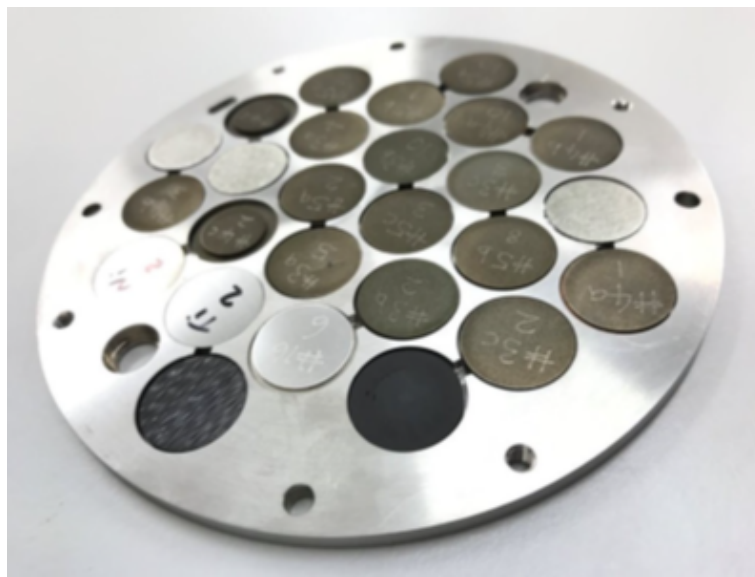
Πίνακας 1. Δείγματα που μελετήθηκαν



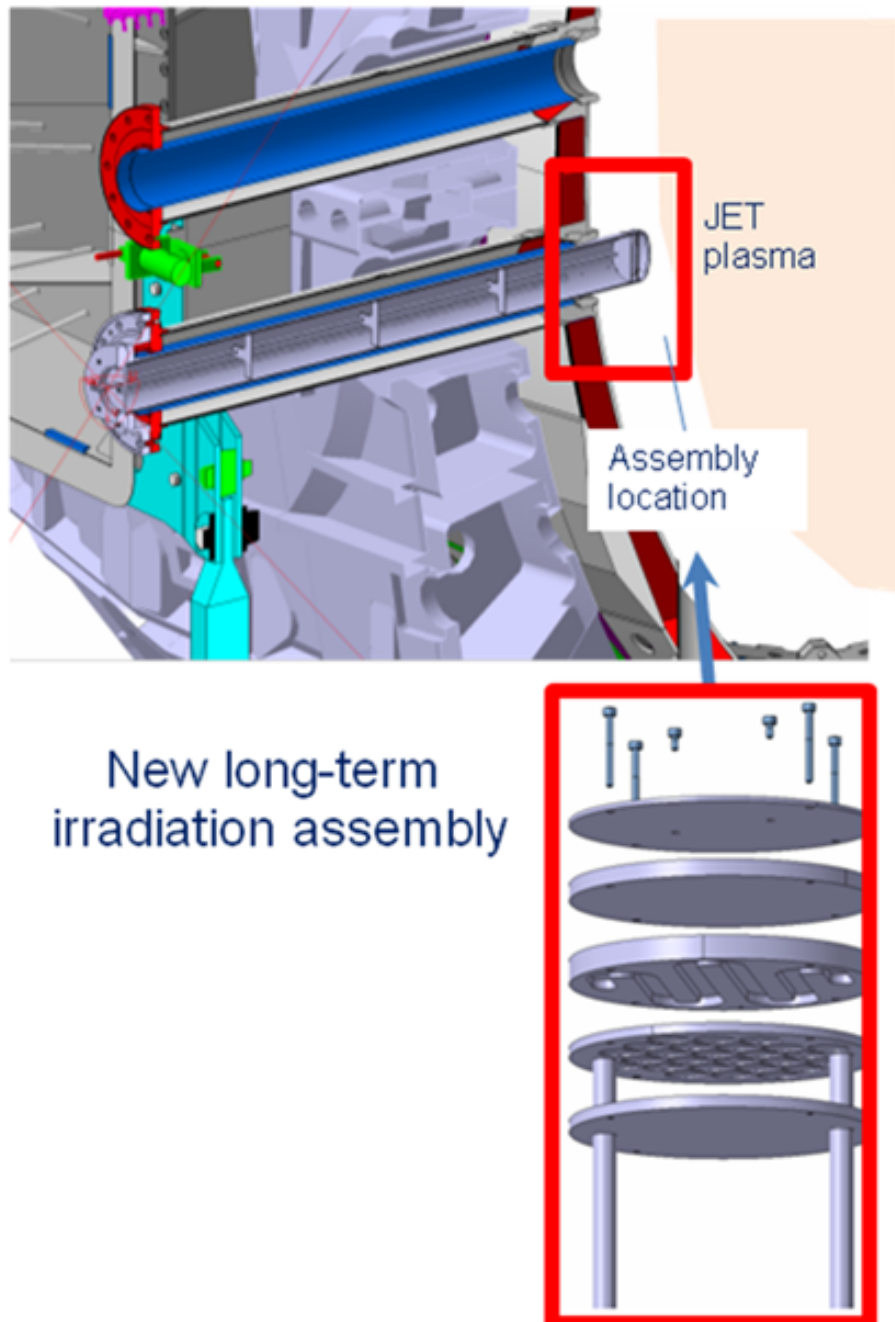
Σχήμα 13 – Θέση υλικών εντός του αντιδραστήρα ITER

4.2 Ακτινοβόληση των δειγμάτων

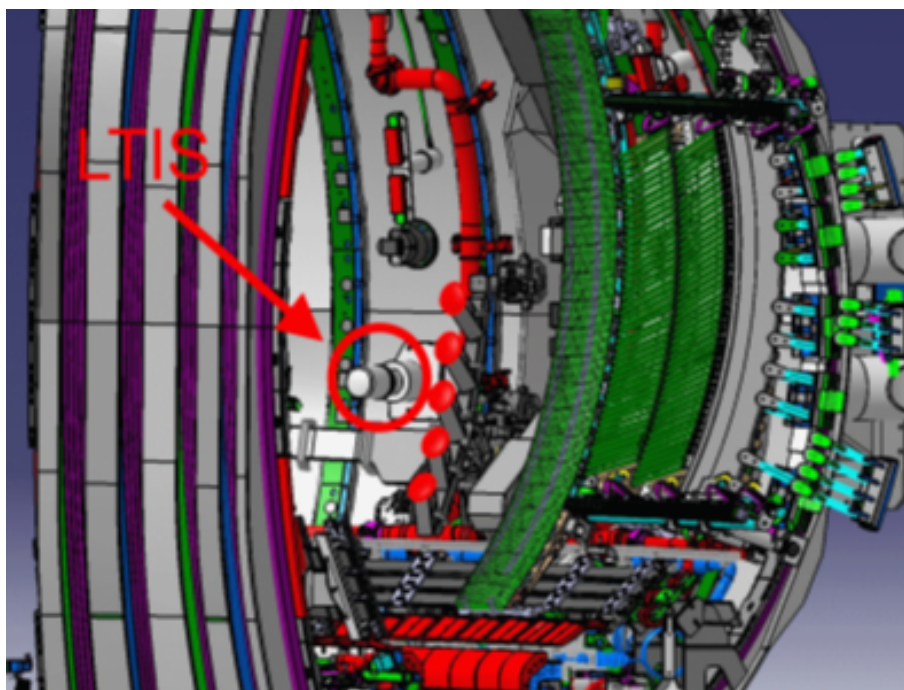
Τα δείγματα που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή, ακτινοβολήθηκαν στον αντιδραστήρα σύντηξης JET στις καμπάνιες (campaigns) Τριτίου-Τριτίου (TT, C40) και Δευτερίου-Τριτίου (DTE2, C41). Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κατάλληλο δειγματοφορέα (ACT holder - Σχήμα 14), ο οποίος στη συνέχεια εισήχθη στον Σταθμό Μακροπρόθεσμης Ακτινοβόλησης (Long Term Irradiation Station-LTIS) πολύ κοντά στο πλάσμα, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 15-16.



Σχήμα 14 – Δειγματοφορέας ACT holder (πηγή: UKAEA)



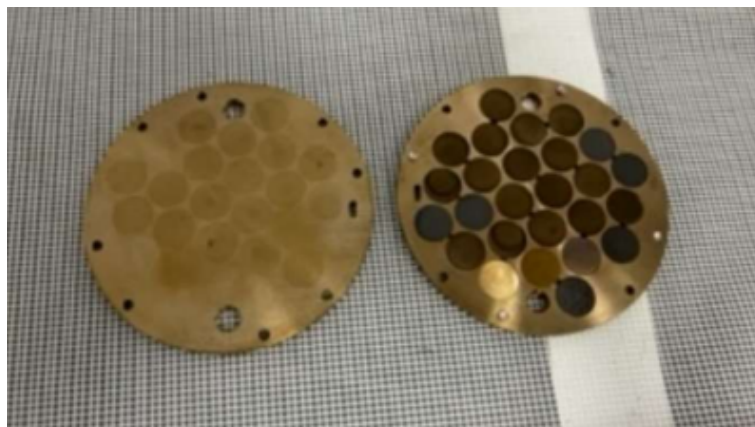
Σχήμα 15 – Θέση ACT holder στο LTIS (πηγή: UKAEA)



Σχήμα 16 – Σταθμός Μακράς Ακτινοβόλησης (LTIS) (πηγή: UKAEA)

Τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν αρχικά στην πρώτη και μοναδική JET T-T campaign που έχει συμβεί μέχρι σήμερα, η οποία έλαβε χώρα από τον Ιανουάριο μέχρι τον Ιούλιο του 2021. Λόγω της θέσης τους πολύ κοντά στο πλάσμα και επομένως των πολύ υψηλών δόσεων, δεν ήταν δυνατή η απομάκρυνση των δειγμάτων πριν την έναρξη της επόμενης ακτινοβόλησης. Συνεπώς, ακτινοβολήθηκαν εκ νέου στην D-T campaign που ακολούθησε, με έναρξη τον Αύγουστο και τερματισμό τον Δεκέμβριο του 2021.

Ο δειγματοφορέας με τα ακτινοβολημένα δείγματα ανακτήθηκε από το LTIS στις 25 Σεπτεμβρίου 2022, μετά το πέρας των δυο campaigns (Σχήμα 17). Τα δείγματα παραδόθηκαν στο ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ' στις 4 Νοεμβρίου 2022.



Σχήμα 17 – ACT holder μετά την ακτινοβόληση

Σε ότι αφορά τις παραμέτρους της ακτινοβόλησης, οι κύριοι στόχοι της T-T campaign ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς του πλάσματος με την παρουσία Τριτίου και η αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης και βιωσιμότητας του κύκλου καυσίμου. Η μέγιστη ισχύς που επετεύχθη κατά τη διάρκεια ορισμένων πειραματικών φάσεων ήταν περίπου 16 MW, ενώ στην πηγή παρήχθησαν 8.52×10^{18} νετρόνια σε συνολικά 546 παλμούς.

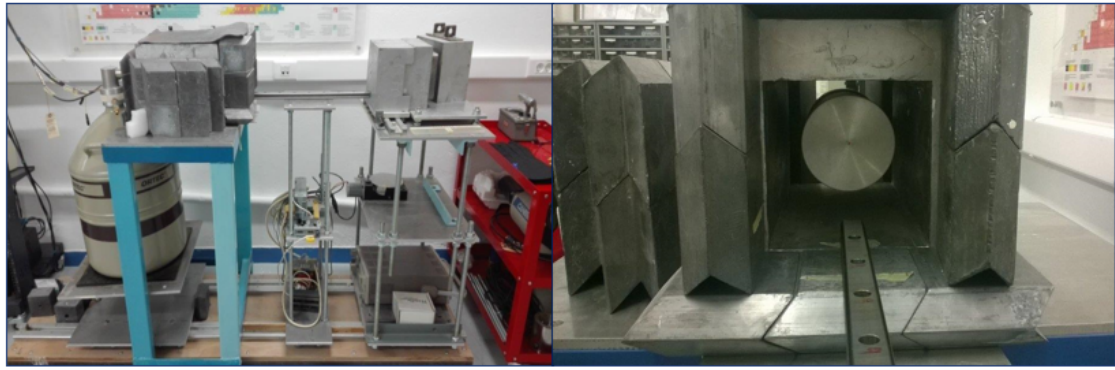
Η D-T campaign (DTE2) επικεντρώθηκε στην επίτευξη πλάσματος υψηλής απόδοσης με συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η πυκνότητα και ο χρόνος συγκράτησης. Κατά τη διάρκειά της σημειώθηκε παγκόσμιο ρεκόρ απόδοσης ενέργειας σύντηξης στα 59 MJ, αλλά και ρεκόρ συνεχόμενης ισχύος σύντηξης στα 10.3 MW κατά μέσο όρο για 5 δευτερόλεπτα. Συνολικά παρήχθησαν στην πηγή 8.5×10^{20} νετρόνια, εκ των οποίων 1.04×10^{20} παρήχθησαν στις 21 Δεκεμβρίου 2021, που ήταν και το μέγιστο ποσοστό ημερήσιας απόδοσης [23]. Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη πειραματική εκστρατεία είναι η μοναδική με καύσιμο D-T στην οποία τα τοιχώματα είχαν διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να μοιάζουν με αυτά που θα χρησιμοποιηθούν στον αντιδραστήρα ITER.

5 Μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας

Η φασματοσκοπία-γ χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και καταγραφή της ακτινοβολίας-γ που εκπέμπεται από ραδιενεργά υλικά. Επιτρέπει την ταυτοποίηση και την ποσοτικοποίηση των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν σε ένα δείγμα, προσφέροντας πολύτιμες γνώσεις για τη φύση και τη σύνθεσή του. Στη φασματοσκοπία-γ, η ενέργεια των προσπίπτουσων ακτίνων-γ μετράται χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ανιχνευτή, στον οποίο εναποτίθεται η ενέργεια των ακτίνων-γ που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Πιο συγκεκριμένα, το 'αποτέλεσμα' που προκύπτει από την ανιχνευτική διάταξη, που περιλαμβάνει τον ανιχνευτή ακτινοβολίας, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά και συνδυάζεται με κάποιο εξειδικευμένο λογισμικό, είναι ένα φάσμα σε μορφή ιστογράμματος που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μετρούμενων γεγονότων σε κάθε επίπεδο ενέργειας (φωτοκορυφές). Η κάθε κρούση-ανίχνευση ακτίνας-γ καταγράφεται σε ένα κανάλι, του οποίου η ενέργεια αντιστοιχεί στην ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου. Οι ανιχνευτές γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe) χρησιμοποιούνται ευρέως στη φασματοσκοπία-γ λόγω της υψηλής ενεργειακής ανάλυσης και ευαισθησίας τους.

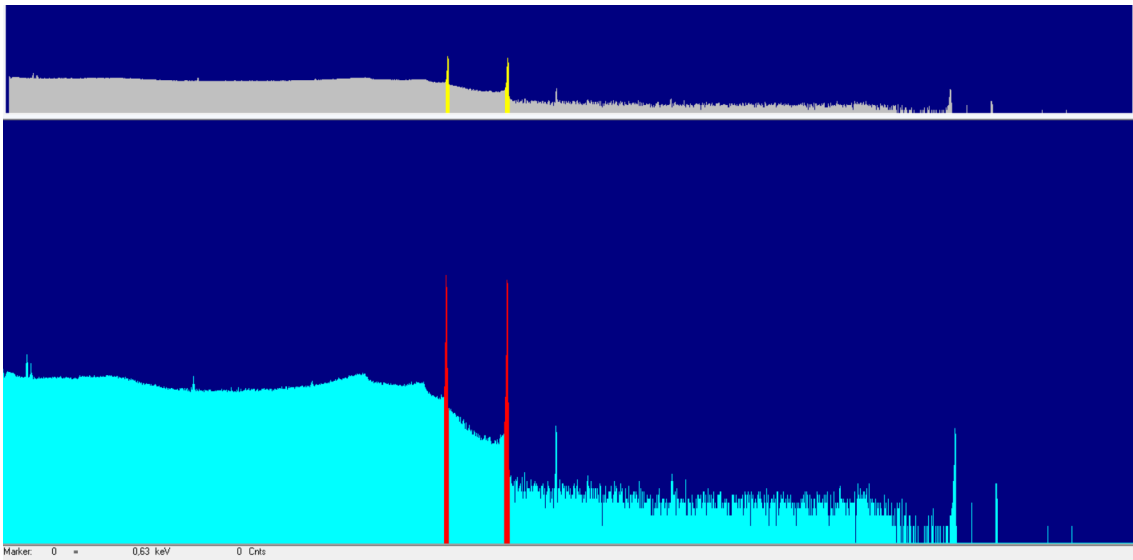
5.1 Ανιχνευτική διάταξη

Για τις πειραματικές μετρήσεις της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένας ομοαξονικός ανιχνευτής γερμανίου (GEM80) υψηλής καθαρότητας (High Purity) και απόδοσης 85%, ο οποίος αποτελεί ημιαγωγό τύπου p. Έχει ενεργειακή διακριτική ικανότητα (Full Width at Half Maximum-FWHM) ίση με 1.67 keV στα 1332 keV του ^{60}Co και λόγο φωτοκορυφής προς Compton (peak to Compton ratio) 93:1. Είναι κατασκευασμένος από την εταιρεία EG&G ORTEC. Ο ανιχνευτής συνδέεται με δοχείο υγρού αζώτου (LN₂), ώστε να ψύχεται, ενώ ο χώρος του εργαστηρίου βρίσκεται διαρκώς σε θερμοκρασία περίπου 20°C. Είναι συνδεδεμένος με ένα πλήρως αυτοματοποιημένο ηλεκτρονικό σύστημα παροχής υψηλής τάσης (2500V), αλλά και ψηφιοποίησης του σήματος, αναλογικό προ-φίλτρο, αναλυτή ύψους παλμών, καθώς και μία ηλεκτρονική μονάδα διόρθωσης των απωλειών λόγω του νεκρού χρόνου (DSPEC™). Τα φάσματα συλλέγονται και αναλύονται από το εξειδικευμένο λογισμικό GammaVision™, της εταιρείας EG&G ORTEC. Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης έναν δειγματοφορέα από plexiglass, με οπή κυκλικής διατομής, ώστε να τοποθετούνται τα δείγματα. Ο δειγματοφορέας είναι τοποθετημένος πάνω σε ράγες αλουμινίου, ώστε να μπορεί να μετακινείται για μετρήσεις σε διάφορες αποστάσεις. Οι ράγες διαθέτουν 9 διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του άξονα του ανιχνευτή. Η πρώτη θέση βρίσκεται σε απόσταση 1cm από το παράθυρο του ανιχνευτή, ενώ η τελευταία σε απόσταση 60cm.



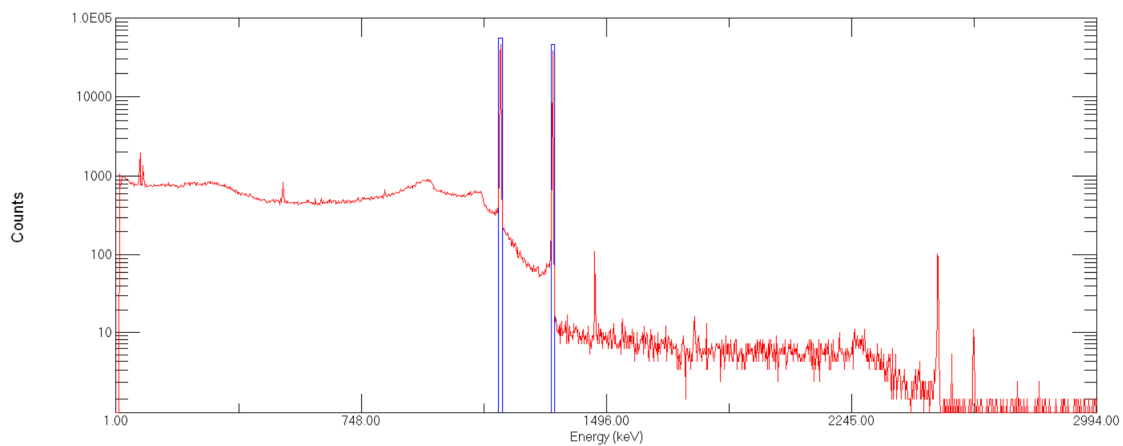
Σχήμα 18 – Φωτογραφίες της πειραματικής διάταξης

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα φάσμα, από μια πηγή αναφοράς, Co-60, όπως καταγράφεται από το λογισμικό Gamma Vision. Έχουν επισημανθεί με κόκκινο χρώμα οι φωτοκορυφές του συγκεκριμένου ισότοπου, ενώ διακρίνονται και ορισμένες ακόμα που προέρχονται κατά βάση από την ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation).



Σχήμα 19 – Φάσμα Co-60 όπως απεικονίζεται στο Gamma Vision

Ακολουθεί η μορφή με την οποία αποθηκεύεται το φάσμα, όπου με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι φωτοκορυφές που έχουν σημειωθεί (Σχήμα 20).



Σχήμα 20 – Εικόνα από Gamma Vision

5.2 Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης

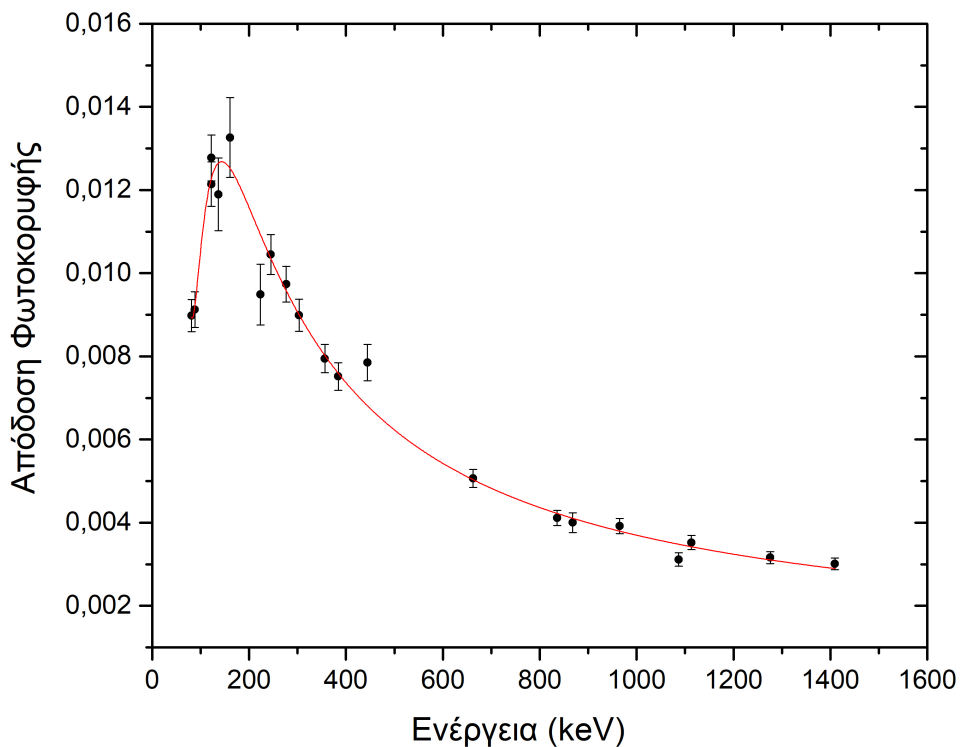
Απόδοση φωτοκορυφής (ή απόλυτη απόδοση φωτοκορυφής) ονομάζεται η ικανότητα ενός ανιχνευτή να ανιχνεύει πλήρως τις ενέργειες φωτονίων μιας συγκεκριμένης αρχικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, το φωτόνιο εναποθέτει ολόκληρη την ενέργειά του κατά την αλληλεπίδρασή του με τον ανιχνευτή. Όλα τα φωτόνια με την ίδια αρχική ενέργεια που εναποτίθενται στον ανιχνευτή, καταγράφονται στο ενεργειακό φάσμα που συλλέγεται κάτω από την αντίστοιχη φωτοκορυφή. Ο λόγος του πλήθους των φωτονίων που μεταφέρουν στον ανιχνευτή όλη την ενέργειά τους και συνεπώς καταγράφονται κάτω από μια φωτοκορυφή, προς τον συνολικό αριθμό φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή φωτονίων, ορίζεται ως απόδοση φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency- FEPE). Η απόδοση φωτοκορυφής είναι μέγεθος απαραίτητο προκειμένου να προσδιοριστεί η ποσότητα του ραδιοϊσοτόπου που ανιχνεύεται κατά την ανάλυση του δείγματος, αναλύοντας το ενεργειακό φάσμα ακτίνων-γ που αυτό εκπέμπει.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση ενός συγκεκριμένου ανιχνευτή εξαρτάται από τη γεωμετρία του δείγματος, καθώς και από τη θέση του σε σχέση με τον ανιχνευτή. Η χρήση ενός ανιχνευτή, προϋποθέτει τη βαθμονόμηση του ως προς την ενέργεια αλλά και ως προς την απόδοσή του. Για την πρώτη παράμετρο, πρέπει να καθοριστεί μια συσχέτιση μεταξύ της κλίμακας των καναλιών και της κλίμακας ενέργειας. Ουσιαστικά, μετά από αυτή τη βαθμονόμηση, κάθε ενεργειακή τιμή θα αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Για τη δεύτερη, χρειάζεται να προσδιοριστεί η απόδοση συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται πηγές αναφοράς, με γνωστές φωτοκορυφές, με βάση τις οποίες προσδιορίζεται η σχέση καναλιών και ενεργειών αλλά και η καμπύλη της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας.

Για την βαθμονόμηση του συγκεκριμένου ανιχνευτή, μετρήθηκαν συνολικά 7 πηγές αναφοράς, τα πιστοποιητικά των οποίων παρατίθενται στο Παράρτημα Β. Οι πηγές αυτές είναι όλες σημειακές και σχήματος κυλινδρικού δίσκου διαμέτρου $25.4mm$. Τοποθετήθηκαν στον δειγματοφορέα στην τρίτη θέση της πειραματικής διάταξης, δηλαδή σε απόσταση $12cm$ από το παράθυρο του ανιχνευτή. Οι μετρήσεις των πηγών αυτών είχαν χρονική διάρκεια από 20 λεπτά μέχρι και 24 ώρες, αναλόγως την ενεργότητα της κάθε πηγής.

Μετά την απαραίτητη επεξεργασία των δεδομένων, εξάγεται μια πρώτη εξίσωση απόδοσης, στην οποία εφαρμόζονται συντελεστές διόρθωσης που προκύπτουν από το λογισμικό “TrueCoinc”, προκειμένου να γίνει η διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης. Έτσι λοιπόν, προκύπτει η τελική μορφή της καμπύλης της απόδοσης φωτοκορυφής (FEPE) συναρτήσεως της ενέργειας των φωτονίων.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται με μαύρο χρώμα οι πειραματικές τιμές της FEPE συναρτήσεως της ενέργειας για απόσταση πηγής-ανιχνευτή $12cm$, ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται η καμπύλη που ‘προσαρμόστηκε’ σε αυτά:



Σχήμα 21 – Καμπύλη βαθμονόμησης GEM80 για απόσταση $12cm$

Η εξίσωση της συγκεκριμένης καμπύλης είναι η εξής:

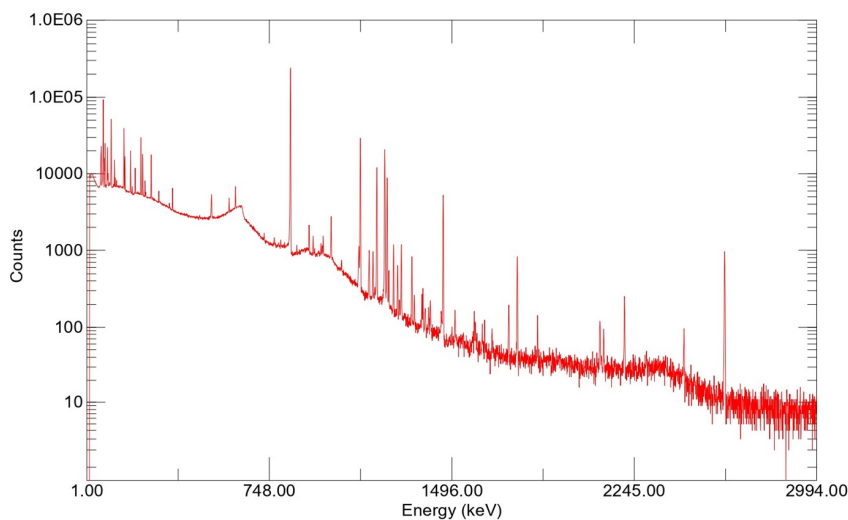
$$y = 7.98912E - 4 + 3.10893 \times x^{-1} - 229.1107 \times x^{-2} - 24837.27028 \times x^{-3} - 4.52783E6 \times x^{-4} + 2.20135E8 \times x^{-5} \quad (9)$$

Η σύγκλιση της καμπύλης με τα πειραματικά σημεία είναι $R^2 = 0.98974$, δηλαδή της τάξης του 99%.

Αντικαθιστώντας λοιπόν την τιμή της εκάστοτε ενέργειας στη θέση της μεταβλητής x στην εξίσωση (9), μπορεί να προσδιοριστεί η απόδοση φωτοκορυφής για κάθε ενέργεια φωτονίων.

5.3 Πειραματικές Μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση και ανάλυση και των 21 δειγμάτων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1. Όλα τα δείγματα μετρήθηκαν με τον δειγματοφορέα στην τρίτη θέση της πειραματικής διάταξης, δηλαδή σε απόσταση 12cm από το παράθυρο του ανιχνευτή. Η θέση αυτή επιλέχθηκε με βάση τα υψηλά επίπεδα ενεργότητάς τους, αφού βρίσκονταν πολύ κοντά στο πλάσμα του αντιδραστήρα. Όλα τα δείγματα μετρήθηκαν από 24 έως 72 ώρες, ενώ μετά το τέλος των μετρήσεων, έγινε μέτρηση την ακτινοβολίας υποβάθρου, προκειμένου να αφαιρεθεί ο αριθμός των κρούσεων που προσμετρώνται στις κορυφές του φάσματος, λόγω των ισοτόπων που υπάρχουν στο φυσικό υπόβαθρο. Στο Σχήμα 22 φαίνεται φάσμα από μέτρηση του υλικού Eurofer.



Σχήμα 22 – Φάσμα υλικού Eurofer

6 Ανάλυση

6.1 Πυρηνικές Αντιδράσεις

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πυρηνικές αντιδράσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση, τα ισότοπα που προκύπτουν και οι κυριότερες φωτοκορυφές τους, μαζί με τα αντίστοιχα ποσοστά εκπεμπόμενων ακτίνων-γ ανά διάσπαση (yield).

Πυρηνική Αντίδραση	Ενέργεια Ακτίνας-γ (keV)	Yield
$^{58}\text{Ni}(n, np/d)^{57}\text{Co}$	122.06	0.856
	136.47	0.107
$^{59}\text{Co}(n, 2n)^{58}\text{Co}$	810.78	0.994
	863.96	0.007
$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	1173.24	0.998
	1332.50	1.000
$^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$	1099.25	0.566
	1291.59	0.433
$^{46}\text{Ti}(n, p)^{46m}\text{Sc}$ $^{46m}\text{Sc}(IT)^{46}\text{Sc}$	889.28	1.000
	1120.55	1.000
$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$	152.43	0.070
	222.11	0.757
	1121.29	0.352
	1189.04	0.165
	1221.40	0.272
	1231.00	0.116
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	834.85	1.000
$^{64}\text{Zn}(n, \gamma)^{65}\text{Zn}$ $^{66}\text{Zn}(n, 2n)^{65}\text{Zn}$	1115.54	0.500

Πίνακας 2. Πυρηνικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση [24]

6.2 Υπολογισμός ενεργότητας και ειδικής ενεργότητας

Για τον υπολογισμό της ενεργότητας των δειγμάτων χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$A = \frac{C}{y \cdot \epsilon \cdot t} \quad (10)$$

όπου: C: τα 'καθαρά' γεγονότα που μετρά ο ανιχνευτής (net counts)

μετά την αφαίρεση του φάσματος υποβάθρου

y: ποσοστό εκπομπής ακτίνων-γ ανά διάσπαση (yield)

ϵ : η απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή (FEPE)

t: ο χρόνος μέτρησης, σε δευτερόλεπτα.

Δεδομένου ότι έγιναν επαναληπτικές μετρήσεις, τα δείγματα μετρήθηκαν σε διάστημα πέντε μηνών (Νοέμβριος 2022 - Απρίλιος 2023), συνεπώς θα ήταν σκόπιμο να γίνει αναγωγή της ενεργότητάς τους σε κάποια ημερομηνία αναφοράς ώστε να μπορεί να υπάρχει μέτρο σύγκρισης. Ως ημερομηνία αναφοράς επιλέγεται το πέρας της ακτινοβόλησης των δειγμάτων στον αντιδραστήρα JET, δηλαδή 21 Δεκεμβρίου 2021 (21:53 ώρα Ηνωμένου Βασιλείου) και η σχέση μέσω της οποίας γίνεται η αναγωγή είναι η εξής:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t_{dec}} \Rightarrow A_0 = A \cdot e^{\lambda \cdot t_{dec}} \quad (11)$$

όπου: λ : η σταθερά διάσπασης, $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$, που με $t_{1/2}$ να συμβολίζεται ο χρόνος ημιζωής του ισοτόπου

t_{dec} : ο χρόνος από το τέλος της ακτινοβόλησης μέχρι τη μέτρηση στο εργαστήριο.

Για τον υπολογισμό της ειδικής ενεργότητας των δειγμάτων, γίνεται διαίρεση της ενεργότητας με τη μάζα του κάθε δείγματος:

$$A_s = \frac{A_0}{m} \quad (12)$$

όπου: m: η μάζα του δείγματος.

6.2.1 Διορθώσεις

Ένα φαινόμενο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό της ενεργότητας είναι το φαινόμενο της αυτοαπορρόφησης (self-attenuation) των ακτίνων-γ από το ίδιο το δείγμα, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.1. Ο διορθωτικός συντελεστής για την ενδοαπορρόφηση, f_γ , υπολογίστηκε με χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo και συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα MCNP5 (Monte Carlo N-Particle v5) [25]. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ακριβές μοντέλο του ανιχνευτή γερμανίου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια προγενέστερης εργασίας [26], ενώ προσομοιώθηκε με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και η γεωμετρία των δειγμάτων. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος της FEPE του ανιχνευτή για ένα δείγμα από κάποιο υλικό και έχοντας συγκεκριμένη γεωμετρία, προς τη FEPE του ανιχνευτή για το δείγμα με την ίδια γεωμετρία, αλλά αντί για υλικό είναι γεμάτο με αέρα. Προσθέτοντας τον συγκεκριμένο συντελεστή στη σχέση (11), προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$A_0 = \frac{C}{y \cdot \epsilon \cdot f_\gamma \cdot t} \cdot e^{\lambda \cdot t_{dec}} \quad (13)$$

Ένα ακόμα φαινόμενο που λαμβάνεται υπόψιν είναι το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.2. Ο συντελεστής διόρθωσης για το συγκεκριμένο φαινόμενο, f_{TCC} , υπολογίζεται με τη βοήθεια του λογισμικού “TrueCoinc”, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πειραματικής Φυσικής Kossuth, της Ουγγαρίας και υποστηρίζεται από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) [27]. Η τελική λοιπόν μορφή της σχέσης υπολογισμού της αρχικής ενεργότητας θα είναι η εξής:

$$A_0 = \frac{C}{y \cdot \epsilon \cdot f_\gamma \cdot f_{TCC} \cdot t} \cdot e^{\lambda \cdot t_{dec}} \quad (14)$$

6.3 Διάδοση σφαλμάτων και υπολογισμός αβεβαιότητας

Πριν γίνει η παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων, χρειάζεται να αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού των σφαλμάτων τους, συνυπολογίζοντας την αβεβαιότητα όλων των μεγεθών που συνεισφέρουν. Λήφθηκαν υπόψιν τα σφάλματα των καθαρών χρούσεων (net counts), του yield, της FEPE, των συντελεστών διόρθωσης f_γ και f_{TCC} , αλλά και του χρόνου μέτρησης. Τα σφάλματα του χρόνου ημιζωής των ισοτόπων ($t_{1/2}$) και της χρονικής διάρκειας από το πέρας της ακτινοβόλησης ως τη μέτρηση (t_{dec}) θεωρούνται αμελητέα.

Σύμφωνα λοιπόν με τη διάδοση σφαλμάτων, η αβεβαιότητα για την τιμή της αρχικής ενεργότητας θα είναι:

$$\sigma(A_0) = \sqrt{\sigma(C)^2 + \sigma(y)^2 + \sigma(\epsilon)^2 + \sigma(f_\gamma)^2 + \sigma(f_{TCC})^2 + \sigma(t)^2} \quad (15)$$

όπου: $\sigma(x) = \left(\frac{\partial A_0}{\partial x} \cdot \delta x\right)$, με x την εκάστοτε ποσότητα που έχει σφάλμα.

Αναλυτικά για την προέλευση του σφάλματος κάθε όρου ισχύει:

δC : Δίνεται από το λογισμικό Gamma Vision για την κάθε κορυφή

δy : Δίνεται από τη βιβλιογραφία [23]

$\delta \epsilon$: Υπολογίστηκε μαζί με τη FEPE

δf_γ : Υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις με τον MCNP5

δf_{TCC} : Εκτιμάται στο 3% της τιμής που προκύπτει από το “TrueCoinc”

δt : Εκτιμάται στο ένα δευτερόλεπτο (1 sec) για κάθε μέτρηση.

7 Αποτελέσματα και συζήτηση

7.1 Συντελεστές διόρθωσης

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστούν οι πίνακες με τις τιμές και τις αβεβαιότητες των δυο συντελεστών διόρθωσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Αρχικά αναφέρονται ξεχωριστά οι συντελεστές διόρθωσης της αυτοαπορρόφησης που υπολογίστηκαν μέσω προσομοίωσης από τον κώδικα MCNP5 και το σχετικό τους σφάλμα. Τα δείγματα έχουν χωριστεί σε πίνακες με βάση το υλικό από το οποίο αποτελούνται, ομαδοποιώντας τα ανάλογα με την πυκνότητά τους.

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
Co-Ni	^{57}Co	122.06	0.943	0.04%
		136.47	0.951	0.04%
	^{58}Co	810.78	0.985	0.08%
		863.96	0.985	0.08%
	^{60}Co	1173.24	0.988	0.10%
		1332.50	0.988	0.11%
	^{59}Fe	1099.25	0.987	0.10%
		1291.59	0.988	0.11%
^{54}Mn	834.85	0.985	0.08%	

Πίνακας 3. Συντελεστές f_γ για τα δοσιμετρικά foils Co και Ni

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
ITER #1-11,23-27	^{57}Co	122.06	0.954	0.04%
		136.47	0.960	0.04%
	^{58}Co	810.78	0.987	0.07%
		863.96	0.987	0.09%
	^{60}Co	1173.24	0.989	0.11%
		1332.50	0.990	0.11%
	^{46}Sc	889.28	0.988	0.08%
		1120.55	0.988	0.09%
	^{54}Mn	834.85	0.987	0.09%
	^{65}Zn	1115.54	0.989	0.10%

Πίνακας 4. Συντελεστές f_γ για τα δείγματα από ανοξείδωτο ατσάλι (SS υλικά)

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
ITER #14-15	^{57}Co	122.06	0.381	0.04%
		136.47	0.465	0.04%
	^{60}Co	1173.24	0.973	0.09%
		1332.50	0.975	0.10%
	^{182}Ta	1121.29	0.973	0.09%
		1189.04	0.974	0.10%
		1221.40	0.975	0.10%
		1231.00	0.975	0.10%
	^{65}Zn	1115.54	0.972	0.09%

Πίνακας 5. Συντελεστές f_γ για τα δείγματα από βολφράμιο (W)

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
ITER #16	^{58}Co	810.78	0.987	0.09%
		863.96	0.987	0.09%
	^{60}Co	1173.24	0.989	0.11%
		1332.50	0.990	0.11%
	^{182}Ta	1121.29	0.989	0.08%
		1189.04	0.989	0.08%
		1221.40	0.990	0.09%
		1231.00	0.990	0.09%
	^{54}Mn	834.85	0.987	0.09%
	^{65}Zn	1115.54	0.988	0.09%

Πίνακας 6. Συντελεστές f_γ για το δείγμα από XM-19

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
ITER #18	^{57}Co	122.06	0.946	0.04%
		136.47	0.954	0.04%
	^{58}Co	810.78	0.986	0.09%
		863.96	0.986	0.09%
	^{60}Co	1173.24	0.989	0.06%
		1332.50	0.990	0.12%
	^{46}Sc	889.28	0.987	0.09%
		1120.55	0.989	0.11%
	^{182}Ta	1121.29	0.989	0.11%
		1189.04	0.989	0.08%
		1221.40	0.990	0.09%
		1231.00	0.990	0.09%
	^{54}Mn	834.85	0.986	0.09%
^{65}Zn	1115.54	0.989	0.11%	

Πίνακας 7. Συντελεστές f_γ για το δείγμα από Inconel

Foil	Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_γ	$\sigma(f_\gamma)$
ITER #19	^{57}Co	122.06	0.951	0.04%
		136.47	0.958	0.04%
	^{60}Co	1173.24	0.989	0.10%
		1332.50	0.990	0.11%
	^{182}Ta	152.43	0.964	0.05%
		222.11	0.975	0.06%
		1121.29	0.990	0.09%
		1189.04	0.990	0.10%
		1221.40	0.990	0.10%
		1231.00	0.990	0.10%
	^{54}Mn	834.85	0.987	0.09%
	^{65}Zn	1115.54	0.990	0.11%

Πίνακας 8. Συντελεστές f_γ για το δείγμα από Eurofer

Στους Πίνακες 9-10 φαίνονται οι συντελεστές διόρθωσης του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, που υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού “TrueCoinc”, με το σφάλμα τους να εκτιμάται στο 3% της τιμής. Ο διαχωρισμός σε δυο πίνακες γίνεται λόγω του ότι σε όλα τα δείγματα, πλην αυτών του βολφραμίου, οι τιμές του συγκεκριμένου συντελεστή είναι ίδιες. Στα δείγματα από βολφράμιο (ITER 14-15) οι τιμές του συγκεκριμένου συντελεστή διαφοροποιούνται, για αυτό και παρουσιάζονται σε ξεχωριστό πίνακα. Η αιτία της διαφοροποίησης είναι πως η πυκνότητα του βολφραμίου είναι σχεδόν διπλάσια σε σχέση με την πυκνότητα των άλλων υλικών, τα οποία έχουν παραπλήσιες τιμές πυκνότητας μεταξύ τους.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_{TCC}	$\delta(f_{TCC})$
^{57}Co	122.06	1.000	0.030
	136.47	1.000	0.030
^{58}Co	810.78	0.997	0.030
	863.96	0.979	0.029
^{60}Co	1173.24	0.980	0.029
	1332.50	0.980	0.029
^{59}Fe	1099.25	0.998	0.030
	1291.59	1.001	0.030
^{46}Sc	889.28	0.980	0.029
	1120.55	0.980	0.029
^{182}Ta	152.43	0.967	0.029
	222.11	0.970	0.029
	1121.29	0.968	0.029
	1189.04	1.021	0.031
	1221.40	0.980	0.029
	1231.00	0.976	0.029
^{54}Mn	834.85	1.000	0.030
^{65}Zn	1115.54	1.000	0.030

Πίνακας 9. Συντελεστές f_{TCC} για όλα τα δείγματα εκτός του W

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	f_{TCC}	$\delta(f_{TCC})$
^{57}Co	122.06	1.000	0.030
	136.47	1.000	0.030
^{60}Co	1173.24	0.980	0.029
	1332.50	0.981	0.029
^{182}Ta	1121.29	0.965	0.029
	1189.04	1.019	0.031
	1221.40	0.978	0.029
	1231.00	0.974	0.029
^{65}Zn	1115.54	1.000	0.030

Πίνακας 10. Συντελεστές f_{TCC} για τα δείγματα W

Οι τιμές από τους παραπάνω συντελεστές διόρθωσης συνυπολογίζονται στην τελική τιμή της ενεργότητας και του σφάλματος για κάθε δείγμα, με βάση τη σχέση (14).

7.2 Ενεργότητα

Με βάση λοιπόν και όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορεί πλέον να παρουσιαστεί η τιμή της αρχικής ενεργότητας και της ειδικής αρχικής ενεργότητας που υπολογίζονται για το κάθε δείγμα. Υπενθυμίζεται ότι ως ημερομηνία αναφοράς έχει επιλεγεί το πέρας της ακτινοβόλησης των δειγμάτων στον αντιδραστήρα JET, δηλαδή η 21η Δεκεμβρίου 2021 (21:53 ώρα Ηνωμένου Βασιλείου). Η παρουσίαση γίνεται σε τέσσερις πίνακες, δυο για την κάθε ποσότητα, που αναγράφεται η τιμή και το αντίστοιχο σφάλμα του κάθε ισότοπου για κάθε δείγμα σε Becquerel (Bq), δηλαδή διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και Becquerel/gram (Bq/g) αντίστοιχα. Στον πρώτο πίνακα εμφανίζονται τα ισότοπα ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co και ^{59}Fe , ενώ στον επόμενο τα ισότοπα ^{46}Sc , ^{182}Ta , ^{54}Mn και ^{65}Zn .

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε πολλά από τα δείγματα ανιχνεύτηκαν περισσότερες από μία φωτοκορυφές, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 του κεφαλαίου 5.3. Για τον λόγο αυτό, έχει υπολογιστεί ο σταθμισμένος μέσος των αποτελεσμάτων για την ενεργότητα, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία στάθμισης που περιγράφεται στο Παράρτημα Α.

Δείγματα	Αρχική Ενεργότητα (Bq)			
	^{57}Co	^{58}Co	^{60}Co	^{59}Fe
Co #1	-	$(4.54 \pm 0.21) \cdot 10^5$	$(9.78 \pm 0.40) \cdot 10^4$	$(5.03 \pm 0.25) \cdot 10^4$
Co #2	$(4.39 \pm 0.36) \cdot 10$	$(4.22 \pm 0.25) \cdot 10^5$	$(9.36 \pm 0.39) \cdot 10^4$	$(4.03 \pm 0.37) \cdot 10^4$
Ni #1	$(9.01 \pm 0.37) \cdot 10^4$	$(2.37 \pm 0.10) \cdot 10^5$	$(1.38 \pm 0.06) \cdot 10^3$	-
Ni #2	$(8.37 \pm 0.34) \cdot 10^4$	$(2.31 \pm 0.10) \cdot 10^5$	$(1.29 \pm 0.05) \cdot 10^3$	-
ITER #1	$(8.39 \pm 0.35) \cdot 10^3$	$(2.32 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(1.34 \pm 0.06) \cdot 10^2$	-
ITER #2	$(9.32 \pm 0.38) \cdot 10^3$	$(2.58 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(1.84 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #3	$(9.97 \pm 0.71) \cdot 10^3$	$(2.60 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(2.32 \pm 0.10) \cdot 10^2$	-
ITER #4	$(8.82 \pm 0.36) \cdot 10^3$	$(2.35 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(1.70 \pm 0.07) \cdot 10^2$	-
ITER #5	$(8.73 \pm 0.36) \cdot 10^3$	$(2.37 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(1.77 \pm 0.07) \cdot 10^2$	-
ITER #6	$(4.95 \pm 0.20) \cdot 10^3$	$(1.38 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(9.83 \pm 0.41) \cdot 10^1$	-
ITER #10	$(1.86 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(5.17 \pm 0.30) \cdot 10^4$	$(4.85 \pm 0.46) \cdot 10^2$	-
ITER #11	$(1.85 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(5.12 \pm 0.24) \cdot 10^4$	$(4.96 \pm 0.20) \cdot 10^2$	-
ITER #14	-	-	(1.52 ± 0.12)	-
ITER #15	$(4.94 \pm 0.42) \cdot 10$	-	(4.76 ± 0.47)	-
ITER #16	-	$(2.31 \pm 0.13) \cdot 10^4$	$(1.76 \pm 0.07) \cdot 10^2$	-
ITER #18	$(4.36 \pm 0.18) \cdot 10^4$	$(1.15 \pm 0.05) \cdot 10^5$	$(7.66 \pm 0.32) \cdot 10^2$	-
ITER #19	$(3.84 \pm 0.37) \cdot 10$	-	$(3.57 \pm 0.17) \cdot 10$	-
ITER #23	$(9.47 \pm 0.39) \cdot 10^3$	$(2.58 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(1.98 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #24	$(9.13 \pm 0.38) \cdot 10^3$	$(2.44 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(1.91 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #25	$(8.81 \pm 0.36) \cdot 10^3$	$(2.45 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(1.86 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #27	$(8.65 \pm 0.36) \cdot 10^3$	$(2.27 \pm 0.13) \cdot 10^4$	$(1.88 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-

Πίνακας 11. Αρχική ενεργότητα των δειγμάτων (I)

Δείγματα	Αρχική Ενεργότητα (Bq)			
	^{46}Sc	^{182}Ta	^{54}Mn	^{65}Zn
Co #1	-	-	-	-
Co #2	-	-	-	-
Ni #1	-	-	$(2.00 \pm 0.16) \cdot 10$	-
Ni #2	-	-	$(1.87 \pm 0.16) \cdot 10$	-
ITER #1	-	-	$(3.36 \pm 0.20) \cdot 10^3$	$(1.61 \pm 0.14) \cdot 10$
ITER #2	-	-	$(4.88 \pm 0.28) \cdot 10^3$	$(4.27 \pm 0.28) \cdot 10$
ITER #3	-	-	$(5.14 \pm 0.30) \cdot 10^3$	$(3.67 \pm 0.26) \cdot 10$
ITER #4	-	-	$(4.62 \pm 0.27) \cdot 10^3$	$(3.84 \pm 0.27) \cdot 10$
ITER #5	-	-	$(4.52 \pm 0.26) \cdot 10^3$	$(4.80 \pm 0.32) \cdot 10$
ITER #6	-	-	$(2.47 \pm 0.14) \cdot 10^3$	$(1.86 \pm 0.16) \cdot 10$
ITER #10	$(3.14 \pm 0.21) \cdot 10^2$	-	$(4.21 \pm 0.25) \cdot 10^3$	$(3.19 \pm 0.28) \cdot 10$
ITER #11	$(2.66 \pm 0.13) \cdot 10^2$	-	$(4.15 \pm 0.24) \cdot 10^3$	$(2.60 \pm 0.24) \cdot 10$
ITER #14	-	$(9.23 \pm 0.83) \cdot 10$	-	(8.83 ± 0.88)
ITER #15	-	$(8.73 \pm 0.83) \cdot 10$	-	(8.46 ± 0.69)
ITER #16	-	$(6.81 \pm 0.31) \cdot 10$	$(8.29 \pm 0.48) \cdot 10^3$	$(3.08 \pm 0.20) \cdot 10$
ITER #18	$(1.81 \pm 0.15) \cdot 10^2$	$(4.58 \pm 0.23) \cdot 10^2$	$(9.47 \pm 0.55) \cdot 10^2$	$(4.19 \pm 0.29) \cdot 10$
ITER #19	-	$(3.74 \pm 0.10) \cdot 10^3$	$(1.74 \pm 0.10) \cdot 10^3$	$(1.53 \pm 0.12) \cdot 10$
ITER #23	-	-	$(3.86 \pm 0.22) \cdot 10^3$	$(3.76 \pm 0.24) \cdot 10$
ITER #24	-	-	$(3.75 \pm 0.22) \cdot 10^3$	$(3.86 \pm 0.27) \cdot 10$
ITER #25	-	-	$(4.83 \pm 0.28) \cdot 10^3$	$(3.70 \pm 0.27) \cdot 10$
ITER #27	-	-	$(4.62 \pm 0.27) \cdot 10^3$	$(4.31 \pm 0.27) \cdot 10$

Πίνακας 12. Αρχική ενεργότητα των δειγμάτων (II)

Δείγματα	Ειδική Ενεργότητα (Bq/g)			
	^{57}Co	^{58}Co	^{60}Co	^{59}Fe
Co #1	-	$(4.10 \pm 0.19) \cdot 10^5$	$(8.82 \pm 0.36) \cdot 10^4$	$(4.53 \pm 0.23) \cdot 10^4$
Co #2	$(4.33 \pm 0.35) \cdot 10$	$(4.15 \pm 0.24) \cdot 10^5$	$(9.22 \pm 0.38) \cdot 10^4$	$(3.97 \pm 0.37) \cdot 10^4$
Ni #1	$(7.97 \pm 0.33) \cdot 10^4$	$(2.10 \pm 0.09) \cdot 10^5$	$(1.22 \pm 0.05) \cdot 10^3$	-
Ni #2	$(7.40 \pm 0.30) \cdot 10^4$	$(2.05 \pm 0.09) \cdot 10^5$	$(1.14 \pm 0.05) \cdot 10^3$	-
ITER #1	$(9.09 \pm 0.38) \cdot 10^3$	$(2.52 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(1.45 \pm 0.06) \cdot 10^2$	-
ITER #2	$(1.01 \pm 0.04) \cdot 10^4$	$(2.79 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(1.99 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #3	$(1.08 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(2.80 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(2.50 \pm 0.10) \cdot 10^2$	-
ITER #4	$(1.00 \pm 0.04) \cdot 10^4$	$(2.67 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(1.94 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #5	$(9.82 \pm 0.40) \cdot 10^3$	$(2.67 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(1.99 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #6	$(9.74 \pm 0.40) \cdot 10^3$	$(2.71 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(1.93 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #10	$(2.02 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(5.61 \pm 0.33) \cdot 10^4$	$(5.26 \pm 0.22) \cdot 10^2$	-
ITER #11	$(2.01 \pm 0.08) \cdot 10^4$	$(5.57 \pm 0.27) \cdot 10^4$	$(5.40 \pm 0.22) \cdot 10^2$	-
ITER #14	-	-	(2.14 ± 0.17)	-
ITER #15	$(6.98 \pm 0.59) \cdot 10$	-	(6.71 ± 0.66)	-
ITER #16	-	$(2.53 \pm 0.15) \cdot 10^4$	$(1.93 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-
ITER #18	$(4.53 \pm 0.19) \cdot 10^4$	$(1.20 \pm 0.05) \cdot 10^5$	$(7.96 \pm 0.33) \cdot 10^2$	-
ITER #19	$(1.08 \pm 0.10) \cdot 10$	-	$(1.00 \pm 0.05) \cdot 10$	-
ITER #23	$(1.02 \pm 0.04) \cdot 10^4$	$(2.79 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(2.14 \pm 0.09) \cdot 10^2$	-
ITER #24	$(1.00 \pm 0.04) \cdot 10^4$	$(2.68 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(2.09 \pm 0.09) \cdot 10^2$	-
ITER #25	$(9.91 \pm 0.41) \cdot 10^3$	$(2.75 \pm 0.16) \cdot 10^4$	$(2.09 \pm 0.09) \cdot 10^2$	-
ITER #27	$(9.39 \pm 0.39) \cdot 10^3$	$(2.47 \pm 0.14) \cdot 10^4$	$(2.05 \pm 0.08) \cdot 10^2$	-

Πίνακας 13. Ειδική αρχική ενεργότητα των δειγμάτων (I)

Δείγματα	Ειδική Ενεργότητα (Bq/g)			
	^{46}Sc	^{182}Ta	^{54}Mn	^{65}Zn
Co #1	-	-	-	-
Co #2	-	-	-	-
Ni #1	-	-	$(1.77 \pm 0.15) \cdot 10$	-
Ni #2	-	-	$(1.65 \pm 0.14) \cdot 10$	-
ITER #1	-	-	$(3.65 \pm 0.21) \cdot 10^3$	$(1.75 \pm 0.15) \cdot 10$
ITER #2	-	-	$(5.28 \pm 0.31) \cdot 10^3$	$(4.62 \pm 0.31) \cdot 10$
ITER #3	-	-	$(5.55 \pm 0.32) \cdot 10^3$	$(3.97 \pm 0.29) \cdot 10$
ITER #4	-	-	$(5.26 \pm 0.31) \cdot 10^3$	$(4.36 \pm 0.30) \cdot 10$
ITER #5	-	-	$(5.08 \pm 0.30) \cdot 10^3$	$(5.40 \pm 0.36) \cdot 10$
ITER #6	-	-	$(4.87 \pm 0.28) \cdot 10^3$	$(3.65 \pm 0.31) \cdot 10$
ITER #10	$(3.41 \pm 0.23) \cdot 10^2$	-	$(4.57 \pm 0.27) \cdot 10^3$	$(3.46 \pm 0.30) \cdot 10$
ITER #11	$(2.89 \pm 0.15) \cdot 10^2$	-	$(4.52 \pm 0.26) \cdot 10^3$	$(2.83 \pm 0.26) \cdot 10$
ITER #14	-	$(1.30 \pm 0.12) \cdot 10^2$	-	$(1.25 \pm 0.12) \cdot 10$
ITER #15	-	$(1.23 \pm 0.12) \cdot 10^2$	-	$(1.19 \pm 0.10) \cdot 10$
ITER #16	-	$(7.48 \pm 0.34) \cdot 10$	$(9.10 \pm 0.53) \cdot 10^3$	$(3.38 \pm 0.22) \cdot 10$
ITER #18	$(1.88 \pm 0.16) \cdot 10^2$	$(4.75 \pm 0.24) \cdot 10^2$	$(9.83 \pm 0.57) \cdot 10^2$	$(4.34 \pm 0.30) \cdot 10$
ITER #19	-	$(1.05 \pm 0.03) \cdot 10^4$	$(4.89 \pm 0.29) \cdot 10^3$	$(4.28 \pm 0.34) \cdot 10$
ITER #23	-	-	$(3.77 \pm 0.22) \cdot 10^3$	$(4.06 \pm 0.26) \cdot 10$
ITER #24	-	-	$(3.51 \pm 0.20) \cdot 10^3$	$(4.23 \pm 0.30) \cdot 10$
ITER #25	-	-	$(4.73 \pm 0.28) \cdot 10^3$	$(4.16 \pm 0.30) \cdot 10$
ITER #27	-	-	$(4.99 \pm 0.29) \cdot 10^3$	$(4.68 \pm 0.29) \cdot 10$

Πίνακας 14. Ειδική αρχική ενεργότητα των δειγμάτων (II)

Η περιεκτική μορφή των πινάκων 11-12 και 13-14 επιτρέπει μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των δειγμάτων. Εξετάζοντας τους πίνακες, είναι προφανές ότι οι μετρούμενες ενεργότητες των ισοτόπων ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ των δειγμάτων. Εύκολα διακρίνεται η ομοιότητα μεταξύ των ατσαλιών που έχουν παρόμοια σύσταση (ITER #1-6,23-27), μεταξύ των κραμάτων (ITER #10-11), αλλά και μεταξύ των δειγμάτων βολφραμίου (ITER #14-15). Από τους Πίνακες 11-14 φαίνεται ότι το ^{60}Co ανιχνεύεται σε όλα ανεξαιρέτως τα δείγματα, με σημαντικά μάλιστα επίπεδα ενεργότητας σε όλα τα υλικά, πλην των δειγμάτων βολφραμίου (ITER #14-15). Παρατηρείται επίσης, ότι τα ισότοπα ^{54}Mn και ^{65}Zn εμφανίζονται σχεδόν σε όλα τα δείγματα. Παρόλα αυτά, οι τιμές της ενεργότητάς τους διαφέρουν σημαντικά, αφού το ^{54}Mn έχει παντού αρκετά υψηλή τιμή, σε αντίθεση με το ^{65}Zn που κατά βάση είναι πιο ασθενές από όλα τα υπόλοιπα ισότοπα.

7.3 Συζήτηση

Από την ανάλυση των πινάκων 11-12 και 13-14 μπορούν να εξαχθούν αρκετές πληροφορίες. Στα δοσιμετρικά foils Co παρατηρείται υψηλή τιμή της ενεργότητας για τα τρία ισότοπα, ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe , ενώ στο δεύτερο foil εμφανίζεται και το ισότοπο ^{57}Co , αλλά με πολύ μικρότερη ενεργότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Η παρουσία του ^{57}Co (που προκύπτει από το Ni μέσω της αντίδρασης $^{58}\text{Ni}(n, np/d)^{57}\text{Co}$) μόνο στο ένα από τα δύο foils Co οφείλεται πιθανότατα στη διαφορετική προέλευση των αντίστοιχων δειγμάτων. Το δείγμα Co #1 προέρχεται από υλικό πολύ υψηλής καθαρότητας (> 99.9% σύμφωνα με το πιστοποιητικό του), ενώ το δείγμα Co #2 από υλικό χωρίς πιστοποιημένη σύσταση και καθαρότητα, επομένως είναι πιθανή η ύπαρξη κάποιας πρόσμιξης Ni. Στα δείγματα του νικελίου εμφανίζονται ισχυρά τα τρία ισότοπα του Co και ασθενέστερα το ισότοπο ^{54}Mn .

Όλα τα ατσάλια καθώς και τα κράματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές ενεργότητας στα ισότοπα του Co και του Mn, ενώ ασθενέστερη είναι η εμφάνιση του Zn. Στα δυο κράματα (ITER #10-11) καθώς και στο δείγμα από Inconel (ITER #18) εμφανίζεται και μια καθόλου αμελητέα ποσότητα ^{46}Sc .

Αξίζει να σημειωθεί πως η ανάλυση της κορυφής του ισοτόπου ^{65}Zn στα 1115.54 keV ήταν αρκετά δύσκολη, καθώς πέραν του ότι δεν καταγράφονταν πολλά counts, βρισκόταν πολύ κοντά σε μια από τις κορυφές του ^{214}Bi , στα 1120.29 keV, το οποίο υπήρχε ως ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation), ενώ σε πολλά φάσματα στο ίδιο σημείο εμφανιζόταν και η κορυφή του ^{182}Ta ενέργειας 1121.29 keV. Σαφώς το ίδιο ισχύει και για τη συγκεκριμένη κορυφή του ^{182}Ta , αλλά και του ^{46}Sc , στα 1120.55 keV οι οποίες πρακτικά ταυτίζονται στα δείγματα που συναντώνται και τα δυο ισότοπα.

Το ^{182}Ta είναι αυτό που εμφανίζεται με αρκετές κορυφές στα υλικά (ITER #14-19). Έχουν επιλεγεί οι κορυφές που αριθμούν σημαντικό αριθμό χρούσεων, έχουν δηλαδή καλή στατιστική και μπορούν να αναλυθούν, δίχως πολύ μεγάλα σφάλματα. Η διαλογή των κορυφών έχει γίνει με χρήση του σταθμισμένου μέσου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Κορυφές οι οποίες παρουσίαζαν σφάλμα μεγαλύτερο του 10% έχουν αγνοηθεί.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τέλος και τα δείγματα από Inconel (ITER #18) και Eurofer (ITER #19) αντίστοιχα, στα οποία συναντώνται τα περισσότερα ισότοπα, με το ^{182}Ta να έχει αξιοσημείωτη τιμή παρότι δεν αναμένεται με βάση την τυπική σύσταση των συγκεκριμένων υλικών.

Οι παραπάνω πίνακες συμβάλλουν στον ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό της αρχικής ενεργότητας των υλικών. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την ενεργότητα των δειγμάτων και τη σύσταση των αντίστοιχων υλικών.

8 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζεται μια σύνοψη των όσων προηγήθηκαν και σχολιάζονται οι μελλοντικές προεκτάσεις που μπορούν να προκύψουν.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας ήταν να μετρηθούν τα επίπεδα ενεργότητας και να διερευνηθούν οι προσμίξεις κάποιων υλικών που έχουν χρησιμοποιηθεί ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως δομικά ή λειτουργικά συστατικά στον αντιδραστήρα ITER. Μια τέτοια μελέτη κρίνεται απαραίτητη αφενός για λόγους ακτινοπροστασίας του προσωπικού που θα εργαστεί στην εγκατάσταση του νέου αυτού αντιδραστήρα και αφετέρου για λόγους ασφάλειας και διαχείρισης των υλικών μετά το πέρας της λειτουργίας του.

Τα δείγματα που μελετήθηκαν, ενεργοποιήθηκαν κατά την ακτινοβόλησή τους με νετρόνια στις T-T και D-T campaigns του αντιδραστήρα JET, το 2021, και στη συνέχεια μετρήθηκαν στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΙΠΡΕΤΕΑ, στο ΕΚΕΦΕ 'ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ', ώστε να προσδιοριστούν τα επίπεδα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Πριν από τη μέτρηση των δειγμάτων, προηγήθηκε βαθμονόμηση του ανιχνευτή γερμανίου GEM80 που χρησιμοποιήθηκε με χρήση πηγών αναφοράς. Μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης, ακολούθησε η μέτρηση της ενεργότητας των δειγμάτων. Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν οι τιμές για την ενεργότητα κατά τη μέτρηση των δειγμάτων και στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η τιμή της αρχικής ενεργότητας, δηλαδή της ενεργότητας στο τέλος της ακτινοβόλησης, καθώς και η ειδική ενεργότητα του κάθε δείγματος, αφού εφαρμόστηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις για τα φαινόμενα που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ο κώδικας MCNP5 για τη διόρθωση του φαινομένου της αυτοαπορρόφησης και το πρόγραμμα TrueCoinc για τη διόρθωση του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης.

Όπως δείχνουν τα αποτελέσματα της μελέτης, τα ισότοπα ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn και ^{65}Zn εμφανίζονται σχεδόν σε όλα τα δείγματα, ενώ σε κάποια ανιχνεύθηκε το ^{46}Sc και το ^{182}Tl .

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν ορισμένα δείγματα στα οποία ανιχνεύονται ισότοπα που δεν αναμένονται. Για παράδειγμα, στα δείγματα από Inconel και Eurofer μετρήθηκε ^{182}Tl παρότι δεν αναμένεται με βάση τη σύσταση των συγκεκριμένων υλικών.

Η μελέτη αυτή καταπιάνεται με ένα σημαντικό πρόβλημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα της σύντηξης, δηλαδή τη ραδιολογική ανάλυση, πιστοποίηση και βελτιστοποίηση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στους μελλοντικούς αντιδραστήρες και τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας μέσω σύντηξης. Η σύσταση των υλικών και ιδιαίτερα η περιεκτικότητά τους σε στοιχεία από τα οποία προκύπτουν μακρόβια ισότοπα είναι καθοριστική παράμετρος για την ενεργοποίησή τους και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό της διάταξης, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα επίπεδα ακτινοβολίας στον χώρο, καθώς και η μάζα των υλικών που θα παραμείνουν ραδιενεργά για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η λειτουργία του JET με πηγή πλάσματος Δευτερίου-Τριτίου παρέχει μοναδικές δυνατότητες για τον ραδιολογικό χαρακτηρισμό αυτών των υλικών, σε επίπεδα νετρονικών ροών αντίστοιχα με αυτά που αναμένονται στο ITER.

Αυτή η εργασία παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τα υπό μελέτη υλικά, που μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτίωση των προδιαγραφών λειτουργίας και της ασφάλειας του επιστημονικού προσωπικού που θα έχει μόνιμη ή περιστασιακή πρόσβαση στο ITER κατά τη λειτουργία του αλλά και για την καλύτερη διαχείριση των υλικών του αντιδραστήρα μετά το πέρας της λειτουργίας του.

8.1 Προοπτικές

Η παρούσα εργασία, ως κομμάτι της συνολικής έρευνας που διεξάγεται σε αυτόν τον τομέα, έχει σημαντικές προοπτικές, αφού αφορά υλικά που χρησιμοποιούνται στον πυρηνικό αντιδραστήρα ITER. Καθώς το ITER αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ορόσημο στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης, η επιτυχής ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων υλικών είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά του.

Μία από τις βασικές μελλοντικές προοπτικές είναι η συνεχής εξερεύνηση και ανάπτυξη υλικών ικανών να αντέξουν τις ακραίες συνθήκες εντός του αντιδραστήρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες, η έντονη ροή ακτινοβολίας και το διαβρωτικό περιβάλλον θέτουν σημαντικές προκλήσεις για τα υλικά του αντιδραστήρα. Η συνεχιζόμενη έρευνα στοχεύει στον εντοπισμό υλικών που παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη θερμότητα και την ακτινοβολία, καθώς και τις λιγότερες δυνατές προσμίξεις από ισότοπα που μπορούν να παράξουν σημαντικά ποσοστά ραδιενέργειας, για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα του αντιδραστήρα.

Επιπλέον, η μελέτη των αλληλεπιδράσεων ακτινοβολίας-ύλης θα συνεχίσει να παίζει ζωτικό ρόλο στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης των υλικών εντός του αντιδραστήρα ITER. Η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων των νετρονίων και των φωτονίων με τα υλικά του αντιδραστήρα θα βοηθήσει στη βελτιστοποίηση των σχεδίων θωράκισης και στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων από την έντονη ακτινοβολία.

Επιπροσθέτως, τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μπορούν να συμβάλουν στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών δοκιμής υλικών και πρωτοκόλλων ειδικά για το ITER. Καθώς το ITER προχωρά από τη φάση κατασκευής στη φάση της λειτουργίας, θα υπάρξει ανάγκη για ολοκληρωμένες δοκιμές υλικών, συμπεριλαμβανομένης της επιτόπιας παρακολούθησης και αξιολόγησης των υλικών υπό συνθήκες λειτουργίας.

Σαφώς, η γνώση που αποκτάται από αυτήν την εργασία μπορεί να επεκταθεί και σε μελλοντικά σχέδια και εφαρμογές αντιδραστήρων σύντηξης πέρα από το ITER. Καθώς η ενέργεια σύντηξης συνεχίζει να διερευνάται ως δυνητικά καθαρή και βιώσιμη πηγή ενέργειας, η ανάπτυξη προηγμένων υλικών ικανών να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους περιβάλλον θα παραμείνει κρίσιμος τομέας έρευνας. Η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει ένα μικρό κομμάτι στο τεράστιο παζλ της συνεχιζόμενης εξερεύνησης υλικών για τον πυρηνικό αντιδραστήρα ITER, αλλά και της ευρύτερης προσπάθειας αξιοποίησης των δυνατοτήτων της ενέργειας σύντηξης και της αντιμετώπισης της παγκόσμιας ενεργειακής πρόκλησης.

Βιβλιογραφία

- [1] Duke Energy. "Fission vs. Fusion – What’s the Difference?" Duke Energy | Nuclear Information Center, 2013, nuclear.duke-energy.com/2013/01/30/fission-vs-fusion-whats-the-difference.
- [2] Krane, Kenneth S., and William G. Lynch. "Introductory Nuclear Physics", μετάφραση στα ελληνικά Κόκκορης Μ., Μερτζιμέκης Θ., Πατρώνης Ν., Στούλος Σ., Εκδόσεις GUTENBERG, 2021, Αθήνα.
- [3] Lépine-Szily, A. "Studies of the Exotic Nuclei N10 and N11 View Project." Article in International Journal of Astrobiology, 2012, <https://doi.org/10.1017/S1473550412000158>. Accessed 6 July 2023.
- [4] "Science - 1Q - Matter Flashcards | Chegg.com." [www.chegg.com, www.chegg.com/flashcards/science-1q-matter-b460b969-0b45-4983-88a1-c536fc1ad92f/deck](http://www.chegg.com/flashcards/science-1q-matter-b460b969-0b45-4983-88a1-c536fc1ad92f/deck). Accessed 6 July 2023.
- [5] World Nuclear Association. "Nuclear Fusion." WNA - World Nuclear Association, Aug. 2021, world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx.
- [6] "Stellarator." Wikipedia, 10 July 2021, en.wikipedia.org/wiki/Stellarator.
- [7] Lanctot, M. "DOE Explains...Tokamaks." Energy.gov, www.energy.gov/science/doe-explainstokamaks.
- [8] Wikipedia Contributors. "Inertial Confinement Fusion." Wikipedia, Wikimedia Foundation, 4 Dec. 2019, en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion.
- [9] Woodley, C.. "Fusion in Brief | Culham Centre for Fusion Energy." Culham Centre for Fusion Energy, Culham Centre for Fusion Energy, 18 Mar. 2019, ccfe.ukaea.uk/fusion-energy/fusion-in-brief/.

- [10] “JET: The Joint European Torus.” Culham Centre for Fusion Energy, ccfe.ukaea.uk/programmes/joint-european-torus/.
- [11] “Joint European Torus.” Wikipedia, 21 Mar. 2021, en.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus.
- [12] ITER. “What Is ITER?” ITER, ITER, 2012, www.iter.org/proj/inafewlines.
- [13] Wikipedia Contributors. “ITER.” Wikipedia, Wikimedia Foundation, 24 Mar. 2019, en.wikipedia.org/wiki/ITER.
- [14] “Neutron Activation Analysis.” www.iaea.org, 15July2016, www.iaea.org/topics/neutron-activation-analysis.
- [15] Gibson, L.T. "ARCHAEOOMETRY AND ANTIQUE ANALYSIS | Metallic and Ceramic Objects." In Encyclopedia of Analytical Science, edited by Paul Worsfold, Alan Townshend, and Colin Poole, Elsevier, 2005, pp. 117-123. ISBN 9780123693976. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00020-0>.
- [16] "How Does Neutron Activation Analysis Work?" Nuclear Operations & Facilities, nuclear.mcmaster.ca/resources/how-does-neutron-activation-analysis-work/.
- [17] “Neutron Activation Analysis Laboratory.” Enerji Enstitüsü, enerji.itu.edu.tr/en/research/laboratories/neutron-activation-analysis-laboratory. Accessed 6 July 2023.
- [18] Chen, C.-Z., and David Y. Hu. “Analysis of Affecting Factors in Neutron Interactions with Gate Oxide in CMOS Transistors.” 2018 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), Mar. 2018, <https://doi.org/10.1109/cstic.2018.8369331>. Accessed 16 Dec. 2022.
- [19] Meroli, S. “How Photons Interact with Matter.” Meroli.web.cern.ch, meroli.web.cern.ch/Lecture_photon_interaction.html.
- [20] Smith, J., and Doe, J. "Interactions of Photons with Matter and Shape of Spectra in X/γ – Ray Spectrometry: 1. Interactions of Photons with Matter." Journal of Nuclear Science, vol. 10, no. 2, 2022, pp. 45-60, DOI: 10.1234/abcd1234.

- [21] Jäderström, H., Mueller W.F., Atrashkevich V., and Adekola A.S.. "True Coincidence Summing Correction and Mathematical Efficiency Modeling of a Well Detector." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 784 (June 2015): 264–68. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.032>.
- [22] L'ANNUNZIATA M. F.. "11 - SOLID SCINTILLATION ANALYSIS." ScienceDirect, Academic Press, 1 Jan. 2003, www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124366039500168.
- [23] Villari R. et al., Neutronics, nuclear waste and safety activities within EUROfusion in support of preparation of ITER operations, 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022), 18-23 September 2022, Dubrovnik, Croatia
- [24] "Livechart - Table of Nuclides - Nuclear Structure and Decay Data." IAEA, 2019, www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html.
- [25] X-5 Monte Carlo Team, 'MCNP - A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5', LA-UR-03-1987 (2003)
- [26] Κουργιαντάκης P., "Μελέτη αυτοαπορρόφησης ακτίνων-γ σε δείγματα όγκου με χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo", Κείμενο Πρακτικής Άσκησης, ΣΕΜΦΕ-ΕΜΠ, Ιούνιος 2023.
- [27] Sudar S., "TRUECOINC, A program for calculation of true coincidence corrections for gamma rays", True Coincidence Program Version 1.01, Institute of Experimental Physics, Kossuth University, Debrecen, Hungary (2000)
- [28] G. Gilmore and J. Hemingway, Practical Gamma-Ray Spectrometry, John Wiley & Sons, Chichester, 1995.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α: Σταθμισμένος Μέσος

Στο παράρτημα αυτό, περιγράφεται η διαδικασία στάθμισης μιας δέσμης τιμών, δηλαδή ο υπολογισμός του σταθμισμένου μέσου και της αβεβαιότητας των τιμών, με βάση τη μεθοδολογία της πηγής [28] της βιβλιογραφίας.

Έστω ότι i μετρήσεις της παραμέτρου x δίνουν:

$$x_1 \pm \delta x_1, x_2 \pm \delta x_2, \dots, x_i \pm \delta x_i$$

όπου: x_1, x_2, \dots, x_i : οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους και

$\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_i$: οι αντίστοιχες αβεβαιότητες.

Στην περίπτωση που οι αβεβαιότητες είναι ίσες μεταξύ τους, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση τιμή των x_i . Αν όμως οι αβεβαιότητες διαφέρουν, δεν είναι στατιστικά σωστός ο απλοϊκός αυτός υπολογισμός, καθώς λαμβάνει εξίσου υπόψη όλες τις τιμές, ανεξαρτήτως του αν αυτές συνοδεύονται από μικρό ή μεγαλύτερο σφάλμα. Η ορθή διαδικασία είναι ο υπολογισμός του 'σταθμισμένου' μέσου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot w_i}{\sum w_i}$$

όπου: w_i : συντελεστές στάθμισης, οι οποίοι είναι ίσοι με το αντίστροφο κλάσμα της απόκλισης της κάθε τιμής, δηλαδή $w_i = \frac{1}{(\delta x_i)^2}$.

Η τυπική απόκλιση της σταθμισμένης μέσης τιμής θα δίνεται τότε από τη σχέση:

$$var(x) = \frac{1}{\sum w_i}$$

η οποία ονομάζεται και 'εσωτερική διακύμανση' (internal variance), διότι λαμβάνει υπόψη μόνο τις αβεβαιότητες των τιμών.

Διαφορετικά, αν συνυπολογιστεί και η διασπορά των τιμών γύρω από τη μέση τιμή, προκύπτει η 'εξωτερική διακύμανση', η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$var(x) = \frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2 \cdot w_i}{\sum w_i}$$

Ανάμεσα στις δύο, επιλέγεται η αβεβαιότητα με τη μεγαλύτερη τιμή, ώστε να αποφεύγεται υποεκτίμηση του σφάλματος. Η πλήρης έκφραση του αποτελέσματος περιλαμβάνει τελικά το σταθμισμένο μέσο και την αντίστοιχη αβεβαιότητα:

$$\bar{x} \pm var(x)$$

Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος και η αβεβαιότητα δέσμης τιμών στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασία.

Παράρτημα Β: Πιστοποιητικά Πηγών Βαθμονόμησης



24937 Avenue Tibbitts
Valencia, California 91355

Tel 661•309•1010
Fax 661•257•8303

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Na-22	Customer:	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	950.8 ± 0.9 days	P.O. No.:	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	Reference Date:	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-7	Contained Radioactivity:	1.016 μCi 37.59 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	1275 keV
Branching ratio used:	0.9994 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.6 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Eu-152	Customer: ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life: 4933 ± 11 days	P.O. No.: P702992
Catalog No.: GF-152-M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1772-79-8	Contained Radioactivity: 0.1079 μ Ci 3.992 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Eu-154 = 0.973%; Gd-153 = 0.468% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was prepared from a weighed aliquot of solution whose activity in μ Ci/g was determined using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	344.3 keV
Branching ratio used:	0.266 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 2.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.6 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-152-M-3,7KBQ.


Quality Control

2-DEC-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Mn-54	Customer: ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life: 312.3 ± 0.4 days	P.O. No.: P702992
Catalog No.: GF-290-1M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1772-79-6	Contained Radioactivity: 1.024 μCi 37.89 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	834.8 keV
Branching ratio used:	0.9998 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 2 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Cs-137	Customer: ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life: 30.17 ± 0.16 years	P.O. No.: P702992
Catalog No.: GF-290-1M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1772-79-5	Contained Radioactivity: 1.031 μCi 38.15 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Cs-134 = 0.0589% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	661.7 keV
Branching ratio used:	0.851 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

- Notes:**
- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
 - EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
 - Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
 - This source has a working life of 5 years.
 - EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide:	Cd-109	Customer:	ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life:	462.6 ± 0.7 days	P.O. No.:	P702992
Catalog No.:	GF-290-1M	Reference Date:	1-Jan-15 12:00 PST
Source No.:	1772-79-2	Contained Radioactivity:	1.003 μCi 37.11 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Ag-108m, Co-60, Mn-54, Sc-46 and Zn-65 each < 0.0001% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	88.0 keV
Branching ratio used:	0.0363 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.7 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.1 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 2.5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Co-57	Customer: ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life: 271.79 ± 0.09 days	P.O. No.: P702992
Catalog No.: GF-290-1M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1772-79-3	Contained Radioactivity: 1.060 μCi 39.22 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

Co-56 = 0.0395%; Co-58 = 0.00853% on 1-Jan-15

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	122.1, 136.5 keV
Branching ratio used:	0.8560, 0.1068 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.2 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 18 months.
- EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

CERTIFICATE OF CALIBRATION GAMMA STANDARD SOURCE

Radionuclide: Ba-133	Customer: ECKERT & ZIEGLER NUCLITEC GMBH
Half-life: 3862 ± 15 days	P.O. No.: P702992
Catalog No.: GF-290-1M	Reference Date: 1-Jan-15 12:00 PST
Source No.: 1772-79-1	Contained Radioactivity: 0.9845 µCi 36.43 kBq

Physical Description:

A. Capsule type:	M (25.4 mm OD x 3.18 mm THK)
B. Nature of active deposit:	Evaporated metallic salt
C. Active diameter/volume:	3 mm
D. Backing:	9.23 mg/cm ² kapton
E. Cover:	0.254 mm aluminized mylar

Radioimpurities:

None detected

Method of Calibration:

This source was assayed using gamma ray spectrometry.

Peak energy used for integration:	302.9, 356.0 keV
Branching ratio used:	0.183, 0.619 gammas per decay

Uncertainty of Measurement:

A. Type A (random) uncertainty:	± 0.4 %
B. Type B (systematic) uncertainty:	± 3.0 %
C. Uncertainty in aliquot weighing:	± 0.0 %
D. Total uncertainty at the 99% confidence level:	± 3.0 %

Notes:

- See reverse side for leak test(s) performed on this source.
- EZIP participates in a NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (as in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- This source has a working life of 5 years.
- EZN Item Code: GF-290-1M.


Quality Control

2-Dec-14
Date

EZIP Ref. No.: 1772-79

ISO 9001 CERTIFIED

Medical Imaging Laboratory
24937 Avenue Tibbitts Valencia, California 91355

Industrial Gauging Laboratory
1800 North Keystone Street Burbank, California 91504

Παράρτημα Γ: Πιστοποιητικό Ανιχνευτή

QUALITY ASSURANCE DATA SHEET GEM Series HPGe (High-Purity Germanium) Coaxial Detector System

Model and Serial Numbers

Detector Model No. GEM 80
 Cryostat Configuration SH-GEM
 Dewar Model DWR-30
 Preamplifier Model 257P
 Preamplifier S/N 1027
 H.V. Filter Model 138
 H.V. Filter S/N 10735

Important Reference Data

Ship Date 6/4/02
 Serial No. 42-P 41150A
 When calling Customer Service, always
 reference this Detector Serial No.

Cryogenic Information

Dewar Capacity 30L Static Holding Time 14 days Detector Cool-Down Time 12 hrs

Dimensions

Crystal Diameter 81.5 mm
 Crystal Length 57.7 mm
 End Cap to Crystal 4 mm

Absorbing Layers

Aluminum 1.00 mm
 Magnesium — mm
 Inactive Germanium 700 μm

High Voltage Bias

Recommended Operating Bias, POSITIVE 2500 V

Performance Specifications*

	Warranted	Measured	Amplifier Time Constant
Resolution (FWHM) at 1.33 MeV, ⁶⁰ Co	<u>2.00</u> keV	<u>1.67</u> keV	<u>6</u> μs
Peak-to-Compton Ratio, ⁶⁰ Co	<u>77:1</u>	<u>93:1</u>	<u>6</u> μs
Relative Efficiency at 1.33 MeV, ⁶⁰ Co	<u>80</u> %	<u>85</u> %	<u>6</u> μs
Peak Shape (FWTM/FWHM), ⁶⁰ Co	<u>2.0</u>	<u>1.9</u>	<u>6</u> μs
Peak Shape (FWFM/FWHM), ⁶⁰ Co		<u>2.5</u>	<u>6</u> μs
Resolution (FWHM) at 122 keV, ⁵⁷ Co	<u>1.10</u> keV	<u>0.67</u> keV	<u>6</u> μs

Other: _____

Data Certified by: Carol DePater Date: 6/4/02

*Measured at a nominal rate of 1000 counts/s unless otherwise specified.