

Ο ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Γράφει ο Κώστας Πάππας



Dr. Costas Pappas είναι πυρηνικός φυσικός και εργάζεται για την Ατομική Ενέργεια του Καναδά (AECL), στους πυρηνικούς αντιδραστήρες CANDU. Υπήρξε ο Γραμματέας του Οργανισμού Πυρηνικής Ενέργειας του Καναδά (1996-2000) για το Quebec και δίδαξε σε έκτακτη βάση το μάθημα της Μηχανικής Πυρηνικών αντιδραστήρων (Nuclear Engineering) στο Πανεπιστήμιο McGill του Μόντρεαλ. Απόφοιτος του Université de Montréal, συνέχισε τις μεταπανεπιστημιακές του σπουδές στο McMaster University, Hamilton, Ontario, πλάι στον καθηγητή Bertram Brockhouse, ο

ο οποίος το 1994 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel για τη Φυσική, για εργασίες που έκανε πάνω στη σκέδαση ουδετερονίων. Costas μελέτησε την μαγνητική δομή της ύλης, σε κρυσταλλική μορφή, σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν (-273°C), οδηγώντας δέσμες ουδετερονίων (neutrons) από τον πειραματικό πυρηνικό αντιδραστήρα του πανεπιστημίου McMaster. Καθ' όλη την μετέπειτα καριέρα του, για 40 χρόνια δουλεύει με την AECL και περιστασιακά στην Νότιο Αφρική σαν σύμβουλος στο PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) project με την SNC Lavalin.

Το φυσικό ουράνιο που βγαίνει από τη γη, αλλά και σε οποιοδήποτε πλανήτη του Ηλιακού μας συστήματος, είναι μείγμα από δύο **ισότοπα**, U-238 σε ποσοστό 99.3% και U-235 σε ποσοστό 0.73%.

Με άλλα λόγια σε κάθε 1000 άτομα στο μείγμα των 2 ισοτόπων του φυσικού ουρανίου τα 993 είναι U-238 και τα 7 είναι U-235.

Τα U-235 και U-238 θεωρούνται μείγμα επειδή είναι **διαφορετικά ισότοπα του ίδιου στοιχείου** (αμφότερα έχουν ατομικό αριθμό $Z=92$), του ουρανίου, και φυσικά εμφανίζονται μαζί στις αναλογίες, που ανάφερα.

Ας μιλήσουμε αστειεύομενοι προς στιγμή, ναι, χρειάζεστε μόνο ένα εξαιρετικά ακριβές μικροσκοπικό τσιμπιδάκι και ένα πολύ ισχυρό μικροσκόπιο. Τοποθετείτε ένα δοχείο και αρχίζετε να διαλέγετε τα άτομα του U-235 από το μείγμα και τα βάζετε στο άδριο δοχείο. Έπειτα από μερικές χιλιάδες και ίσως εκατομμύρια χρόνια θα έχετε μαζέψει όλο το U-235 που απαιτείται να φτιάξετε την βόμβα.

Εντάξει, ας μιλήσουμε τώρα ρεαλιστικά. Το φυσικό ουράνιο, όπως ανάφερα πιο πάνω περιέχει περίπου 1% ουράνιο-235 και 99% ουράνιο-238.

Αν το εξατμίσετε και το περάσετε μέσω μιας πολύ προηγμένης φυγόκεντρου αερίου, μπορείτε να βγάλετε κάτι με λίγο περισσότερο ουράνιο-235. Στη συνέχεια, το περνάτε μέσω μιας άλλης προηγμένης φυγόκεντρου αερίου και η απόδοση αυξάνεται ξανά ελαφρώς σε περιεκτικότητα U-235. Αν το κάνετε αυτό χιλιάδες φορές σε διάστημα αρκετών ετών, μπορείτε να καταλήξετε με ουράνιο ποιότητας όπλων, το οποίο είναι περίπου 90% ουράνιο-235, αλλά όσο κι αν συνεχίσετε, δεν θα φτάσετε ποτέ στο 100% καθαρό ουράνιο-235. Αυτή η διαδικασία είναι στην πραγματικότητα το δύσκολο κομμάτι της κατασκευής πυρηνικών όπλων. Η απόκτηση επαρκούς ουρανίου ποιότητας όπλων είναι μια ακραία μηχανική και υλικοτεχνική πρόκληση. Μόλις έχετε

αρκετό ουράνιο ποιότητας όπλων, η δημιουργία έκρηξης είναι στην πραγματικότητα εκπληκτικά απλή. Και τώρα ας μιλήσουμε ακόμα αναλυτικότερα.

Δεν μπορούν να διαχωριστούν με χημικά μέσα, λόγω των πανομοιότυπων χημικών ιδιοτήτων τους, αλλά μόνο μέσω φυσικών μεθόδων, όπως ο διαχωρισμός ισοτόπων.

Το **σχάσιμο ισότοπο με ουδετερόνια κάθε ενέργειας είναι το U-235** που περιέχεται σε ελάχιστη ποσότητα μέσα στο φυσικό ουράνιο. Και το ουράνιο U-238 είναι σχάσιμο, αλλά με ουδετερόνια που έχουν ενέργειες πάνω από 1 MeV. Επομένως στην φυσική του αυτή κατάσταση, με ελάχιστο U-235, δεν μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει ούτε για βόμβες, αλλά ούτε και για καύσιμο σε πυρηνικό αντιδραστήρα, εκτός από τον Καναδικό CANDU (λόγω της χρήσης βαρέως ύδατος).

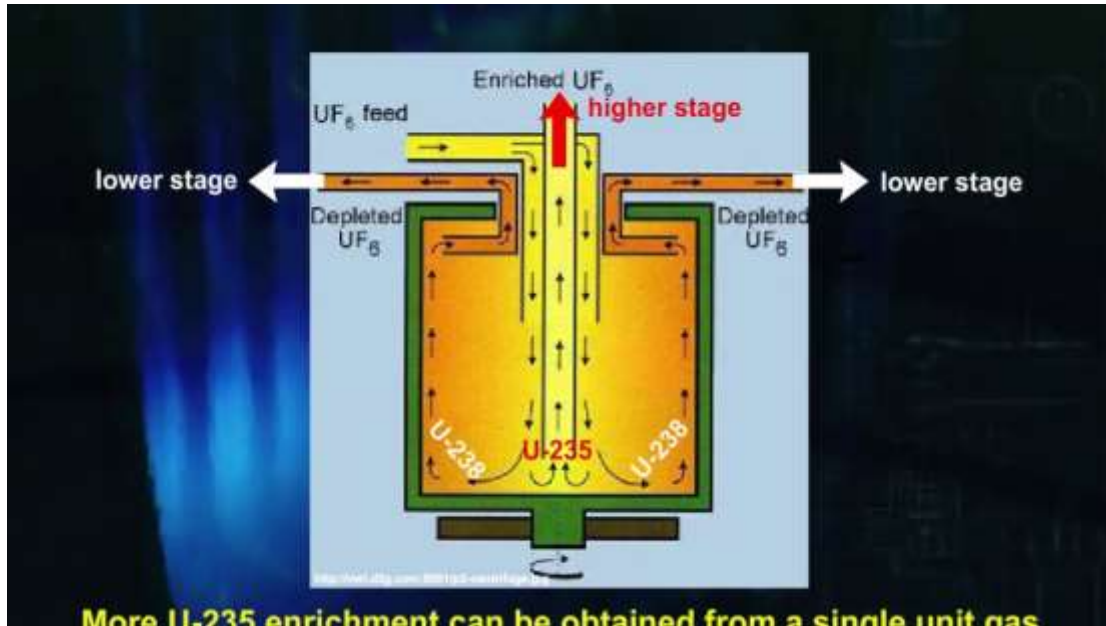
Η λύση λοιπόν είναι να αυξηθεί η ποσότητα του U-235, **δηλαδή να εμπλουτιστεί με U-235**. Ανάλογα με τον βαθμό εμπλουτισμού του φυσικού Ουρανίου με U-235 διακρίνουμε τις εξής 6 κατηγορίες:

- **Φυσικό - Natural uranium:** Contains 0.73% U-235. Καύσιμο σε πυρηνικό αντιδραστήρα Καναδικό CANDU (λόγω της χρήσης βαρέως ύδατος).
- **Slightly enriched uranium (SEU):** Contains between 0.9% and 3 - 5% U-235, που χρησιμοποιείται για καύσιμο σε Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος (ΗΠΑ και αλλού)
- **Low-enriched uranium (LEU):** Contains between 0.73% and 20% U-235
- **High-assay low-enriched uranium (HALEU):** Contains between 5% and 20% U-235 για πειραματικούς και ισοτόπων Αντιδραστήρες
- **Highly enriched uranium (HEU):** Contains more than 20% U-235
- **Weapons-grade HEU (WG-HEU):** Contains 90% or more U-235 για Πυρηνικές βόμβες Και σαφώς θεωρείται ένα NO, NO ειδικά σε ακραίες χώρες.

Πως γίνεται ο εμπλουτισμός; Πάρα πολύ δύσκολο.

Και για να γίνω σαφής, εμπλουτισμός δεν σημαίνει ότι προσθέτουμε U-235 εξωτερικά, αλλά με κάποια φυσική μέθοδο ανακύκλωσης, ξεχωρίζουμε το U-235 από το U-238 και σε κάθε ανακύκλωση δημιουργούνται δύο ροές και δύο στοίβες. Η μία με περισσότερο U-235 και η άλλη με περισσότερο U-238 και έπειτα από πολλές ανακυκλώσεις καταλήγουμε στα ποσοστά που ανάφερα πάρα πάνω. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι, όπως διάχυση, Μαγνητική, Laser, Φυγοκέντρωσης κλπ.

Εδώ θα εξηγήσω την μέθοδο της Φυγοκέντρωσης που χρησιμοποιείται ευρέως στις ημέρες μας. Στην μέθοδο αυτή, οι φυσικοί εκμεταλλεύονται την μικρή διαφορά βάρους των δύο ισοτόπων. Το ελαφρύτερο 235 μονάδες βάρους και το βαρύτερο 238. Η διαφορά ανεπαίσθητη.



More U-235 enrichment can be obtained from a single unit gas

Κεντρόφυγα

Ο εμπλουτισμός με φυγόκεντρο αερίου είναι η τρέχουσα διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται ο εμπορικός εμπλουτισμός στις Ηνωμένες Πολιτείες, αλλά και στο Ιράν. Φωτογραφία. Το UF₆ μπαίνει πάνω αριστερά. Το απεμπλουτισμένο (περισσότερο 238) βγαίνει από την περιφέρεια στις 2 **lower stage** εξόδους και πάει στο εν σειρά κύκλωμα. Το εμπλουτισμένο βγαίνει από το κέντρο επάνω στο παράλληλο **higher stage** κύκλωμα.

Το Ουράνιο σαν μέταλλευμα είναι στερεό και επομένως αδύνατο να το περιστρέψουν σε μια κεντρόφυγα, ακόμα και αν το κονιορτοποιήσουν, γιατί το μετατρέπουν σε αέριο για να επιτευχθεί η φυγοκέντρωση.

Ενώνουν το φυσικό ουράνιο με φθόριο, το κάνουν αέριο φτιάχνοντας εξαφθοριούχο ουράνιο (Uranium hexafluoride UF₆). Σε αέρια μορφή τροφοδοτούν μία συσκευή που λέγεται κεντρόφυγα (centrifuge), που με τη βοήθεια ενός μοτέρ στο κάτω μέρος περιστρέφεται με ιλιγγιώδη ταχύτητα 100,000 -200,000 στροφές στο λεπτό - rpm, όπως φαίνεται στο πρώτο σχήμα. Υπερηχητικές ευθύγραμμες ταχύτητες 2 Mach επιτυγχάνονται ενίοτε.

Αυτή η περιστροφή δημιουργεί μια ισχυρή φυγόκεντρη δύναμη (2ος Νόμος του Νεύτωνα για κυκλική κίνηση-στο βιβλίο φυσικής σας)

$$F = mv^2 / r \quad (1)$$

Όπου F = Φυγόκεντρος δύναμη, m= μάζα του πυρήνα U-235 ή U-238, v =ταχύτητα περιστροφής και r = η ακτίνα της κεντρόφυγας.

έτσι ώστε τα βαρύτερα άτομα (μεγαλύτερη μάζα m) αερίου (UF₆ που περιέχουν άτομα U-238) διαγράφοντας μεγαλύτερη τροχιά, λόγω της μεγαλύτερης F να κινούνται προς το εξωτερικό του

κυλίνδρου. Τα ελαφρύτερα άτομα αερίου (που περιέχουν U-235) συγκεντρώνονται πιο κοντά στο κέντρο. Με την φυγόκεντρο δύναμη το βαρύτερο αέριο εξέρχεται από διαφορετική έξοδο.

Έτσι τα δύο ισότοπα διαχωρίζονται. Επειδή η χρονοβόρα αυτή μέθοδος του διαχωρισμού διαφυγοκέντρησης παράγει απειροστά μικρή ποσότητα ανά κεντρόφυγα, για να παράγουν ικανές ποσότητες εμπλουτισμένου ουρανίου, πρέπει να έχουν ταυτόχρονα πολλές χιλιάδες κεντρόφυγες να δουλεύουν αναλώνοντας τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.

Γνωρίζουμε ότι ένα κλάσμα είναι μεγαλύτερο όσο μεγαλώνει ο αριθμητής του, αλλά και όταν μικραίνει ο παρονομαστής του.

Για να το πετύχουμε περιστρέφουμε με ιλιγγιώδη **ταχύτητα (v)**, αυξάνοντας τον αριθμητή και μάλιστα στο τετράγωνο της ταχύτητας (τύπος 1) και μικραίνοντας τον παρονομαστή, μεγαλώνουμε ακόμα το κλάσμα (Από τον τύπο 1 εξηγείται γιατί ενώ η κεντρόφυγα είναι μεγάλη σε ύψος έχει πέρα πολύ μικρή διάμετρο $-r$ στον παρονομαστή, παρατηρήστε την φωτογραφία κάτω).

Ο λόγος βρίσκεται στην πάρα πάνω εξίσωση, που εκφράζει την Φυγόκεντρο δύναμη. Με άλλα λόγια τεράστια ηλεκτρική ισχύ για να εργάζονται όλα τα μοτέρ ταυτόχρονα και συνεχώς.



Το ρεύμα αερίου που είναι ελαφρώς εμπλουτισμένο σε U235 αποσύρεται από τον σωλήνα στο κέντρο και τροφοδοτείται στην επόμενη φυγόκεντρο, το επόμενο **ανώτερο στάδιο** προς την έξοδο.

Το ελαφρώς εξαντλημένο ρεύμα (με χαμηλότερη συγκέντρωση U-235) και περισσότερο U-238 ανακυκλώνεται πίσω στο επόμενο **χαμηλότερο στάδιο** για να ξανά-ανακυκλωθεί.

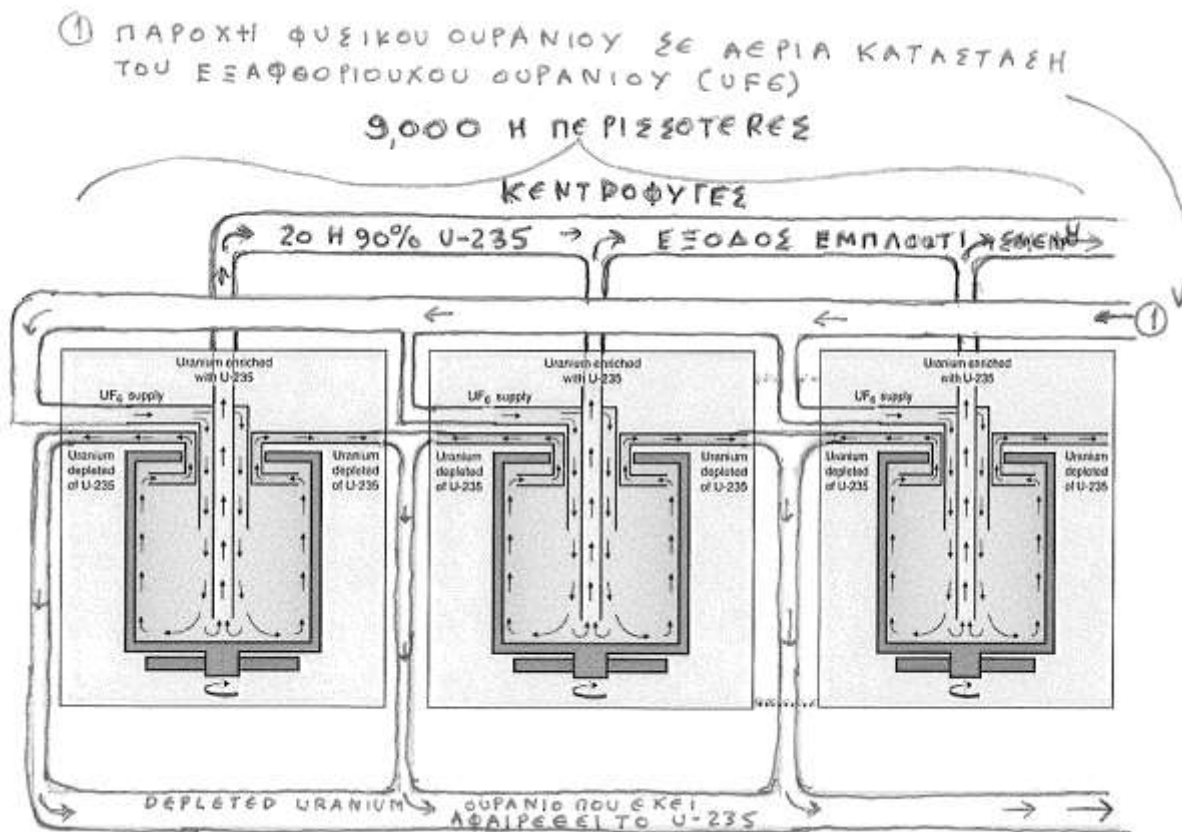
Μια εγκατάσταση φυγοκέντρωσης αερίου περιέχει μεγάλες σειρές πολλών περιστρεφόμενων κυλίνδρων. Αυτοί οι κύλινδροι συνδέονται τόσο σε σειρές όσο και σε παράλληλους σχηματισμούς.

Στο τελικό σημείο απόσυρσης, το UF6 εμπλουτίζεται στην επιθυμητή ποσότητα.

Μια εικόνα εργοστασίου φυγοκέντρωσης με μερικές χιλιάδες κεντρόφυγες στη δεύτερη εικόνα. Έτσι λοιπόν συνδέουν όλες τις κεντρόφυγες παράλληλα, όπως δείχνει η δεύτερη εικόνα. Σας πιάνει ίλιγγος μέσα σε μια ζούγκλα αλληλοσυνδεδεμένων συσκευών

Φανταστείτε λοιπόν τις χιλιάδες συνδέσεις σε τρεις κεντρικές αρτηρίες, όπως ακριβώς είναι το αποχετευτικό σύστημα μιας πόλης. Η είσοδος του νερού σε όλα τα σπίτια και η έξοδος από όλα.

Για να δείξω πως γίνεται η σύνδεση, σχεδίασα το τρίτο σχήμα με το χέρι, δείχνοντας τις δύο πρώτες κεντρόφυγες και την τελευταία, βάζοντας αποσιωπητικά (τελίτσες) ανάμεσα στην δεύτερη και την τελευταία, για να δείξω ότι υπάρχουν μερικές χιλιάδες ανάμεσα.



Εδώ ένας κεντρικός αγωγός τροφοδοτεί τις χιλιάδες κεντρόφυγες με αέριο φυσικό εξαφθοριούχο ουράνιο που διακλαδώνεται στις χιλιάδες κεντρόφυγες, όπως δείχνει το χειροποίητο σχήμα μου.

Οι κεντρόφυγες το διαχωρίζουν και σε 3 κεντρικούς αγωγούς εξόδου, στους 2 οδηγείται το Depleted Ουράνιο (δηλαδή το απεμπλουτισμένο εκείνο που έχει λιγότερο U-235) ενώ το εμπλουτισμένο ανάλογα με το ποσοστό U-235 που θέλουμε, περνάει στον τρίτο αγωγό από τις χιλιάδες κεντρόφυγες.

Έτσι λοιπόν συλλέγεται το εμπλουτισμένο ουράνιο.