«Αθηνά»
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΠΛΩΝ
Δ/νση: Θ. Χατζίκου 11, Θεσσαλονίκη 56122, Τηλ/Fax: 2310-904794 / 6944165341, www.armscontrol.info

ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Θεόδωρος Ε. Λιόλιος [1,2]
[1] Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων, Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών
Τομέας Φυσικών Επιστημών & Εφαρμογών, Εργαστήριο Πυρηνικής-Ατομικής Φυσικής
Βάρη Αττικής, 16673

[2] Ελληνικό Κέντρο Ελέγχου Όπλων, Θ.Χατζίκου 11, Θεσσαλονίκη 56122

20 Απριλίου 2006

Εισαγωγή

Το Ιράν δέχεται σήμερα δριμύτατες κατηγορίες διότι εμπλουτίζει ουράνιο χωρίς την άδεια των θεσμοθετημένων διεθνών οργανισμών. Η διεθνής κοινότητα για ακόμη μια φορά θα βρεθεί μπροστά στο μέγα θέμα της πυρηνικοποίησης μιας χώρας και των σχετικών επιπτώσεών. Ενδεχομένως να υπάρξουν και κυρώσεις που θα επιβληθούν από τον ΟΗΕ ίσως και με τη μορφή μιας στρατιωτικής επέμβασης. Ποιες συνθήκες διέπουν την πυρηνικοποίηση μιας χώρας; Έχει κάθε χώρα το δικαίωμα να εμπλουτίζει το ουράνιο που εξορύσσει από τα δικά της εδάφη; Τι είναι εμπλουτισμός ουρανίου και πως γίνεται;
Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Ελέγχου Όπλων ξεκινάει μια εκστρατεία ενημέρωσης σχετικά με το θέμα αυτό έτσι ώστε οι Έλληνες πολίτες να έχουν άποψη και να μπορούν να αξιολογούν τις πολιτικές αποφάσεις που θα ληφθούν εναντίον του Ιράν.
Στο πρώτο στάδιο της ενημέρωσης η «Αθηνά» δημοσιεύει ένα σύντομο οδηγό σχετικά με την έννοια και τις διαδικασίες εμπλουτισμού ουρανίου.

Γενικές ιδιότητες Ουρανίου

Το φυσικό Ουράνιο εμπεριέχεται στο μετάλλευμα Ουρανίου με τη μορφή πισσουρανίτη (U_3O_8 [1]) που είναι ένα μίγμα των οξειδίων UO_2, UO_3. Ο πισσουρανίτης βρίσκεται στο ακατέργαστο μετάλλευμα σε αναλογία κατά βάρος περίπου 0.5% (Αυστραλία) έως 20% (Καναδάς), έτσι ώστε για κάθε τόνο μεταλλεύματος (ανάλογα με το μεταλλείο) να παίρνουμε από 5 έως 200 κιλά πισσουρανίτη.
Το Ουράνιο είναι ασημόχρωμο στην ακατέργαστη του μορφή και αποτελείται από τρία διαφορετικά ισότοπα: Ουράνιο-238 ($^{238}_{92}U$), Ουράνιο-235 ($^{235}_{92}U$), Ουράνιο-234 ($^{234}_{92}U$) με τις εξής αναλογίες κατά

[1] «yellowcake» η «pitchblende» η αλλιώς πισσουρανίτης

www.armscontrol.info

βάρος: $^{238}_{92}U$ (99.28%), $^{235}_{92}U$ (0.71%), $^{234}_{92}U$ (0.0055%). Όλα τα παραπάνω ισότοπα είναι ραδιενεργά και μεταπίπτουν με α και β διασπάσεις σε ελαφρότερα ισότοπα όπως το Θόριο, το Ράδιο, τα ισότοπα Μολύβδου κλπ, μέχρι να καταλήξουν στο σταθερό ισότοπο του Μολύβδου-206.
Τα ισότοπα του Ουρανίου αν και έχουν το ίδιο αριθμό πρωτονίων (92) που τους δίνει τις ίδιες φυσικοχημικές ιδιότητες, έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων που τους προσδίδει διαφορετικές ραδιολογικές ιδιότητες. Κατά συνέπεια το κάθε ισότοπο έχει τον δικό του ρυθμό και τρόπο διάσπασης, αλληλεπιδρά διαφορετικά με άλλα υποατομικά σωματίδια και φυσικά έχει διαφορετικό δείκτη επικινδυνότητας.
Αν και το ισότοπο $^{235}_{92}U$ είναι σε αναλογία μικρότερη από 1% κατά βάρος στο φυσικό Ουράνιο η ραδιενέργειά του είναι τουλάχιστον εφτά φορές μεγαλύτερη από αυτή του $^{238}_{92}U$ ανά μονάδα βάρους. Αντίστοιχα το απειροελάχιστο $^{234}_{92}U$ έχει 18.000 φορές μεγαλύτερη ραδιενέργεια από το ισότοπο $^{238}_{92}U$. Έτσι λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι σε μία ποσότητα φυσικού ουρανίου το 49% της ραδιενέργειας προέρχεται από το $^{234}_{92}U$ ενώ τα ισότοπα $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$ δίνουν αντίστοιχα ποσοστά ραδιενέργειας 2,2% και 48,8%.
Η ενεργός διατομή του Ουρανίου-238 είναι πολύ μικρή για να δώσει την σχάση που απαιτείται στους αντιδραστήρες και τα πυρηνικά όπλα. Αντιθέτως το Ουράνιο-235 έχει μεγαλύτερη ενεργό διατομή και συνεπώς η αύξηση της συγκέντρωσης του είναι πρωταρχικής σημασίας στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Η αύξηση αυτή επιτυγχάνεται με τις μεθόδους που αναλύονται στη συνέχεια.

Εμπλουτισμός και απεμπλουτισμός του Ουρανίου

Πριν τη χρήση του σε πυρηνικούς αντιδραστήρες και πυρηνικά όπλα το Ουράνιο πρέπει να «εμπλουτιστεί», που σημαίνει να αυξηθεί η συγκέντρωση κατά βάρος στο ισότοπο $^{235}_{92}U$. Ειδικότερα το Ουράνιο που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο των αντιδραστήρων πρέπει να έχει 2%-5% κατά βάρος $^{235}_{92}U$ ενώ αντίστοιχα το Ουράνιο των πυρηνικών όπλων έχει υψηλή καθαρότητα σε $^{235}_{92}U$, της τάξης των 97% κ.β. Η διαδικασία εμπλουτισμού θα δώσει ως προϊόν ένα υλικό που προσεγγιστικά θα περιέχει $^{238}_{92}U$ σε αναλογία 97% (πυρηνικά καύσιμα) και 5% (πυρηνικά όπλα), ενώ θα προκύψει και ένα υποπροϊόν που θα περιέχει 0.2% $^{235}_{92}U$ και 99.8% $^{238}_{92}U$ που ονομάζεται εκφυλισμένο Ουράνιο (Depleted Uranium η απλά DU).

www.armscontrol.info

ΟΥΡΑΝΙΟ

↓

ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑ

↓ **0,5% - 20%**

ΦΥΣΙΚΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

U-234	ΙΧΝΗ
U-235	0,7%
U-238	99,3%

ΟΥΡΑΝΙΟ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

U-234	ΙΧΝΗ
U-235	2%~5%
U-238	<98%

ΟΥΡΑΝΙΟ ΟΠΛΩΝ

U-234	1%
U-235	93,5%
U-238	5,5%

↓

ΕΚΦΥΛΙΣΜΕΝΟ ΟΥΡΑΝΙΟ

U-234	ΙΧΝΗ
U-235	0,2%
U-238	99,8%

ΑΣΠ (1999)
Έδρα Ειδικών Όπλων
Δρ.Θ.Λιόλιος

Σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί η ποσότητα του $^{234}_{92}U$ στο DU είναι και ποσοτικά (αλλά και ραδιολογικά) αμελητέα[2].

Πίνακας 3.1.1: Ισότοπα φυσικού και εκφυλισμένου ουρανίου

Ισότοπο	Χρόνος ημιζωής[i] (χρόνια)	Ειδική Ενεργότητα[3] (Ci/g)	Συγκέντρωση[4 ii iii] (% κατά βάρος)	
			Natural U	Deplet
U-234	$2.46 \cdot 10^{5}$	$6.22 \cdot 10^{-3}$	0.0054	0.0007
U-235	$7.04 \cdot 10^{8}$	$2.16 \cdot 10^{-6}$	0.711	0.2
U-236	$2.34 \cdot 10^{7}$	$6.47 \cdot 10^{-5}$		0.003
U-238	$4.47 \cdot 10^{9}$	$3.36 \cdot 10^{-7}$	99.28	99.8
Φυσικό Ουράνιο		$6.85 \cdot 10^{-7}$		
Εκφυλισμένο Ουράνιο (DU)		$3.85 \cdot 10^{-7}$		

Παραγωγή UF_6 **και** UCl_4

Πριν τον ισοτοπικό εμπλουτισμό του Ουρανίου θα πρέπει να γίνει επεξεργασία του μεταλλεύματος που θα οδηγήσει στην παραγωγή χημικών ουσιών που θα μπορέσουν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν άμεσα στην προσαύξηση της συγκέντρωσης του Ουρανίου-235. Το προϊόν της επεξεργασίας του μεταλλεύματος Ουρανίου, που όπως είπαμε είναι γνωστό ως πισσουρανίτης με χημικό τύπο U_3O_8, περιέχει συνήθως 60%-80% Ουράνιο και έως 20% προσμίξεις. Ο πισσουρανίτης θα αποθηκευθεί σε βαρέλια (συνήθως) των 200 λίτρων και θα οδηγηθεί στο επόμενο στάδιο της επεξεργασίας σκοπός της οποίας είναι να παραχθούν δύο βασικές χημικές ουσίες υψηλής καθαρότητας:

Εξαφθοριούχο Ουράνιο[5] (UF_6)

Τετραχλωριούχο Ουράνιο UCl_4

Υπάρχουν δύο διαδικασίες παραγωγής (UF_6) από τις πρώτες ύλες:

[2] Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το U-234 είναι α-ραδιενεργό και καταλήγει συνήθως σε ελαφρώς διεγερμένους πυρήνες που εκπέμπουν ασθενή γάμμα ακτινοβολία.
[3] Ειδ. Ενεργότητα (Ci/g) = $3.57 \cdot 10^{5}/At_{½}$, όπου A είναι το ατομικό βάρος και $t_{½}$ ο χρόνος ημιζωής σε χρόνια.
[4] Γενικά η συγκέντρωση U-235 στο εκφυλισμένο Ουράνιο κυμαίνεται από 0.2% έως 0.3%. Το DU που χρησιμοποιείται από το Υπ.Άμυνας των ΗΠΑ περιέχει περίπου 0.2% U-235 και μόνο ίχνη από U-236 (από επενεπεξεργασμένο ουράνιο).. Στο DU που περιέχει 0.2% U-235, η συγκέντρωση U-234 είναι περίπου 6.4 έως 7.2 ppmw, ανάλογα με την συγκέντρωση του U-235 στο εμπλουτισμένο προϊόν .
[5] Γνωστό ως hex (χεξ)

www.armscontrol.info

Η υγρή μέθοδος
Στη μέθοδο αυτή το U_3O_8 διαλύεται σε νιτρικό οξύ HNO_3 και το αδιάλυτο ίζημα απομακρύνεται με φιλτράρισμα η φυγοκέντρηση. Το Ουράνιο διαχωρίζεται από το όξινο διάλυμα με τη μορφή νιτρικού ουρανιλίου το οποίο μετατρέπεται σε τριοξείδιο του ουρανίου UO_3 με θερμική αφαίρεση αζώτου. Στη συνέχεια το UO_3 μετατρέπεται σε διοξείδιο του ουρανίου UO_2 με υδρογόνο η με αμμωνία NH_3.

Η ξηρή μέθοδος
Με τη μέθοδο αυτή ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται συνεχώς κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η οποία παράγει αμμωνιακά άλατα του Ουρανίου. Αυτά τα άλατα μετατρέπονται σε UO_3 με θέρμανση και στη συνέχεια, με επίδραση υδρογόνου η αμμωνίας όπως και στην υγρή μέθοδο, παράγεται το UO_2.

Τα επόμενα βήματα για την παραγωγή του UF_6 είναι κοινά και για τις δύο μεθόδους με την έννοια ότι το UO_2 μετατρέπεται σε UF_4 με υδρογονοφθορίωση (χρησιμοποιώντας αέριο υδροφθόριο HF). Στη συνέχεια το UF_4 μετατρέπεται σε UF_6 χρησιμοποιώντας ηλεκτρολυτικά παραγόμενο φθόριο (F_2) σε αέρια μορφή. Στην ξηρή μέθοδο το UF_6 εμπλουτίζεται με μια διαδικασία απόσταξης δύο βημάτων. Άμεση φθορίωση του UO_3 σε UF_6 έχει χρησιμοποιηθεί άλλά αυτή η διαδικασία είναι κατάλληλη για μικρής κλίμακας εμπλουτισμό.

Όσον αφορά τη διαδικασία παραγωγής UCl_4 αυτή είναι σχετικά απλή και συνοψίζεται στην αντίδραση CCl_4 με καθαρό UO_2 σε θερμοκρασία 650 ^0C

Οι δύο χημικές ενώσεις UF_6 και UCl_4 θα χρησιμοποιηθούν στις περαιτέρω διαδικασίες εμπλουτισμού ως πρώτη ύλη. Η πρώτη ένωση κυριαρχεί στην πλειοψηφία των μεθόδων ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται στη μέθοδο του ηλεκτρομαγνητικού διαχωρισμού.
Οι διαδικασίες που αναλύθηκαν χρησιμοποιούνται ευρέως στην επεξεργασία του πισσουρανίτη και οι τεχνολογίες που τις χαρακτηρίζουν είναι αυτές που χρησιμοποιούν HF, NH_3, F_2, CCl_4 για την παραγωγή UF_6 και UCl_4

Ισοτοπικός εμπλουτισμός Ουρανίου
Το δυσκολότερο βήμα μιας επιτόκου χώρας[6] προς την κατασκευή πυρηνικών όπλων η πυρηνικού αντιδραστήρα είναι η απόκτηση των σχάσιμων υλικών. Η χώρα αυτή θα πρέπει να αποκτήσει το οικονομικό, τεχνολογικό και βιομηχανικό υπόβαθρο για την απόκτηση και διαχείριση των υλικών αυτών. Δεν είναι τυχαίο ότι η παραγωγή Ουρανίου υψηλής καθαρότητας απορρόφησε πάνω από το 80% του προϋπολογισμού του σχεδίου Manhattan το 1945 στο Los Alamos (1,9 δισ.δολλάρια του 1945).
Τα σχάσιμα υλικά που παράγουν ελεγχόμενη (πυρηνικοί αντιδραστήρες) η ανεξέλεγκτη (όπλα) ενέργεια είναι κυρίως τα δύο ισότοπα του Ουρανίου $^{235}U, ^{233}U$ και το Πλουτώνιο ^{239}Pu. Ο εμπλουτισμός

[6] Proliferant country

www.armscontrol.info

Ουρανίου ανάλογα με το ποσοστό του ^{235}U που περιέχει το τελικό προϊόν παράγει τις εξής δύο κατηγορίες Ουρανίου

Ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού (LEU)[7]
Στο προϊόν αυτό υπάρχει αναλογία του ισοτόπου 235 σε σαφώς μεγαλύτερη αναλογία από την φυσική (0,72%) αλλά συνήθως δεν υπερβαίνεται το ποσοστό 5% . Το ουράνιο αυτό είναι κατάλληλο για την παραγωγή ενέργειας στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Ουράνιο υψηλού εμπλουτισμού (HEU)[8]
Στο προϊόν αυτό έχουμε σαφώς μεγαλύτερη ισοτοπική αναλογία σε Ουράνιο-235 από αυτή του LEU και συνήθως εννοούμε αναλογία σε ποσοστό 90% η υψηλότερη. Το HEU ονομάζεται επίσης και Ουράνιο οπλικής βαθμίδας (WgU)[9] αφού χρησιμοποιείται στην κατασκευή όπλων.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι ακόμη και σήμερα υπάρχει ένας όρος για μια κατηγορία εμπλουτισμένου Ουρανίου οπλικής βαθμίδας, Oralloy:Oak Ridge alloy, ο οποίος πηγάζει από το κράμα που κατασκευάστηκε στο Oak Ridge στη διάρκεια του 2ου παγκοσμίου πολέμου και περιέχει Ουράνιο σε ποσοστό 93,5%.

Οι μέθοδοι ισοτοπικού διαχωρισμού (εμπλουτισμού ουρανίου) είναι:

1) Ηλεκτρομαγνητικός διαχωρισμός (EMIS[10])
Η διαδικασία βασίζεται στην αρχή του φασματογράφου μάζας. Δύο φορτισμένα σωματίδια που εισέρχονται σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο θα διαγράψουν κυκλικές τροχιές με διαφορετικές ακτίνες. Ειδικότερα δύο ιόντα Ουρανίου $^{235}U^{+}, ^{238}U^{+}$ που έχουν το ίδιο φορτίο αλλά διαφορετική μάζα θα διαγράψουν ημικυκλικές τροχιές σε ομογενές πεδίο με διαφορετικές ακτίνες. Εάν οι κινητικές τους ενέργειες κατά την είσοδο τους είναι ίσες τότε η ακτίνα της τροχιάς του βαρύτερου ιόντος $^{238}U^{+}$ θα είναι μεγαλύτερη από του ελαφρύτερου $^{235}U^{+}$. Η διαφορά αυτή των ακτίνων επιτρέπει το διαχωρισμό των ισοτόπων και τη συλλογή τους σε «θύλακες συλλογής». Η διαδικασία αυτή παράγει Ουράνιο οπλικής βαθμίδας (WgU) σε δύο στάδια . Για την παραγωγή όμως αξιόλογης ποσότητας χρειάζονται εκατοντάδες τέτοιες διατάξεις εξ'αιτίας της μικρής απόδοσης της μεθόδου και του μεγάλου χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ των διαδοχικών σταδίων.
Τα ιόντα Ουρανίου συλλέγονται στους θύλακες (δεξαμενές) που βρίσκονται σε καταστάσεις κενού μέσα στο ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο. Η πηγή των ιόντων είναι ατμοί τετραχλωριούχου Ουρανίου UCl_4 που προήλθαν από ηλεκτρική θέρμανση στερεού UCl_4. Ειδικότερα τα μόρια του UCl_4 βομβαρδίζονται με ηλεκτρόνια για να παραχθούν ιόντα U^{+}. Τα ιόντα αυτά επιταχύνονται με μεγάλες ταχύτητες με ένα ισχυρό ηλεκτρικό δυναμικό και, μετά την είσοδό τους στο ομογενές μαγνητικό πεδίο, ακολουθούν μία κυκλική τροχιά κάθετη στο μαγνητικό πεδίο. Στις ΗΠΑ, οι διατάξεις EMIS είναι τέτοιες ώστε η δέσμη των ιόντων διαγράφει ένα τόξο 180^{0} πριν τα ιόντα περάσουν από τα διαφράγματα συλλογής. Ένα

[7] LEU: Low Enriched Uranium
[8] HEU:Highly Enriched Uranium
[9] WgU :Weapons grade Uranium
[10] Electromagnetic Isotope Separation

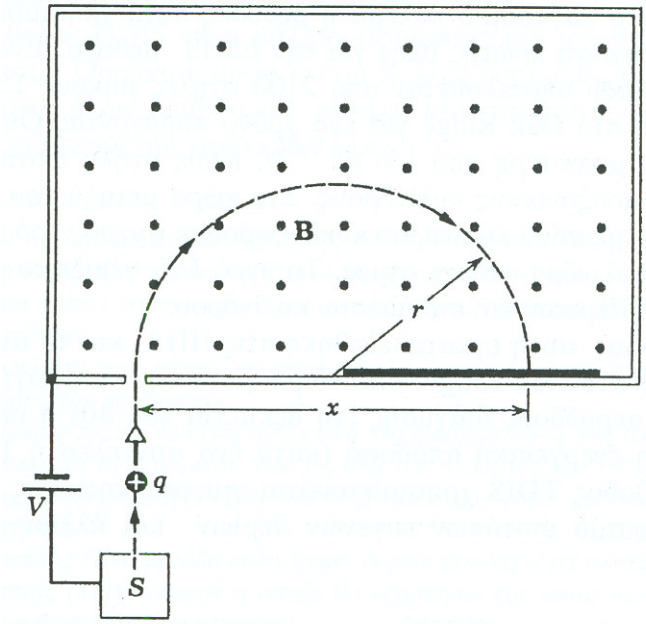
www.atmscontrol.info

μεγάλο πρόβλημα είναι επίσης η μικρή απόδοση της μεθόδου. Ειδικότερα λιγότερο από τη μισή ποσότητα UCl_4 μετατρέπεται στα επιθυμητά ιόντα U^+ ενώ επίσης λιγότερα από τα επιθυμητά ιόντα συλλέγονται τελικά. Η διαδικασία συλλογής και απομάκρυνσης των άχρηστων υποπροϊόντων από το εσωτερικό των δεξαμενών είναι επίπονη, χρονοβόρα και αυξάνει δραματικά τον απαιτούμενο χρόνο λειτουργίας ενώ ελαττώνει παράλληλα την απόδοση της μεθόδου EMIS.

Η μέθοδος EMIS στις ΗΠΑ για την κατασκευή οπλικής βαθμίδας Ουρανίου έχει τα εξής δύο στάδια:

Φυσικό η ελαφρώς εμπλουτισμένο ουράνιο εμπλουτίζεται σε βαθμό 12%-20%.

Το προϊόν του πρώτου σταδίου εμπλουτίζεται περαιτέρω σε ποσοστό οπλικής βαθμίδας (>90%).



Η αρχή της μεθόδου EMIS

Για να γίνει ελαχιστοποίηση του χώρου και των απαιτούμενων υλικών τα στάδια αυτά πραγματοποιούνται σε συνεχείς ωοειδείς η ορθογώνιες διατάξεις που λέγονται στίβοι. Στις διατάξεις αυτές οι δεξαμενές εναλλάσσονται με τους ηλεκτρομαγνήτες. Για την ιστορία αναφέρουμε ότι η μέθοδος EMIS αναπτύχθηκε το 1945 στο πανεπιστήμιο Berkeley των ΗΠΑ με τη χρήση κύκλοτρων (cyclotrons) και για το λόγο αυτό οι μονάδες διαχωρισμού ονομάζονται καλουτρόνια[11] .
Η μέθοδος EMIS είναι δυαδική δηλαδή χρησιμοποιήθηκε και για ειρηνικούς σκοπούς όπως η παραγωγή διαφόρων ισοτόπων. Αν και η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τις μεγάλες πυρηνικές δυνάμεις για την παραγωγή Ουρανίου οπλικής βαθμίδας, τα προβλήματα που τη συνοδεύουν σε

[11] CALUTRONS=CAL(ifornia)+U(ranium)+Cyclo(TRONS)

συνδυασμό με τη χαμηλή της απόδοση οδήγησαν στην εγκατάλειψή της. Όμως μπορεί σήμερα κάλλιστα να αποτελέσει μια άμεση επιλογή επίτοκων κρατών αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόγραμμα παραγωγής Ουρανίου οπλικής βαθμίδας μικρής κλίμακας , όπως έγινε (σύμφωνα με την UNSCOM)[12iv] με το Ιράκ.

2) Θερμική διάχυση (TDIS[13])

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τους νόμους μετάδοσης της θερμότητας σε λεπτά υμένεα η αέρια για να πετύχει τον ισοτοπικό διαχωρισμό. Με την ψύξη ενός καθέτου υμένεου στη μία του πλευρά και την ταυτόχρονη θέρμανση της άλλης θα έχουμε τη δημιουργία ρευμάτων μεταφοράς τα οποία θα προκαλέσουν μια ροή προς τα άνω στην θερμή πλευρά και μια ροή προς τα κάτω στην ψυχρή πλευρά. Υπό τις συνθήκες αυτές θα έχουμε διάχυση των ελαφρότερων μορίων ^{235}U προς την θερμή πλευρά και των βαρύτερων ^{238}U προς την ψυχρή πλευρά. Οι κινήσεις αυτές σε συνδυασμό με τα ρεύματα μεταφοράς θα συγκεντρώσουν τα ελαφρά μόρια ^{235}U στην κορυφή του υμέναιου ενώ τα βαρύτερα μόρια ^{238}U θα συγκεντρωθούν στη βάση.

Η μέθοδος TDIS χαρακτηρίζεται από την απλότητά του, το μικρό οικονομικό κόστος και τη μεγάλη κατανάλωση θερμότητας που απαιτείται. Στο 2ο παγκόσμιο πόλεμο η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πρώτης ύλης για την EMIS μέθοδο. Ένα μεγάλο εργοστάσιο που αποτελούνταν από 2100 στήλες μήκους 15 μέτρων λειτούργησε στο Oak Ridge για ένα χρόνο παράγοντας Ουράνιο με καθαρότητα μικρότερη από 1% σε ^{235}U. Κάθε στήλη αποτελούνταν από τρεις ομοαξονικούς κυλίνδρους. Στο χώρο μεταξύ του εξωτερικού και του μεσαίου κυλίνδρου κυκλοφορούσε ψυχρό νερό ενώ στον εσωτερικό κύλινδρο υπήρχε ατμός. Το υγρό UF_6 γέμιζε το χώρο μεταξύ του εσωτερικού και ενδιάμεσου κυλίνδρου.
Η μέθοδος αυτή εγκαταλείφθηκε στις ΗΠΑ , και το αντίστοιχο εργοστάσιο στο Oak Ridge διαλύθηκε μετά την εισαγωγή της μεθόδου της αεριώδους διάχυσης (τη δεκαετία του 40) η οποία έχει μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση (κατά ένα συντελεστή 140). Σήμερα η μέθοδος TDIS χρησιμοποιείται για ερευνητικούς σκοπούς στο διαχωρισμό ισοτόπων ευγενών αερίων και άλλων ελαφρών ισοτόπων.

3) Αεριώδης διάχυση(GDIS[14])

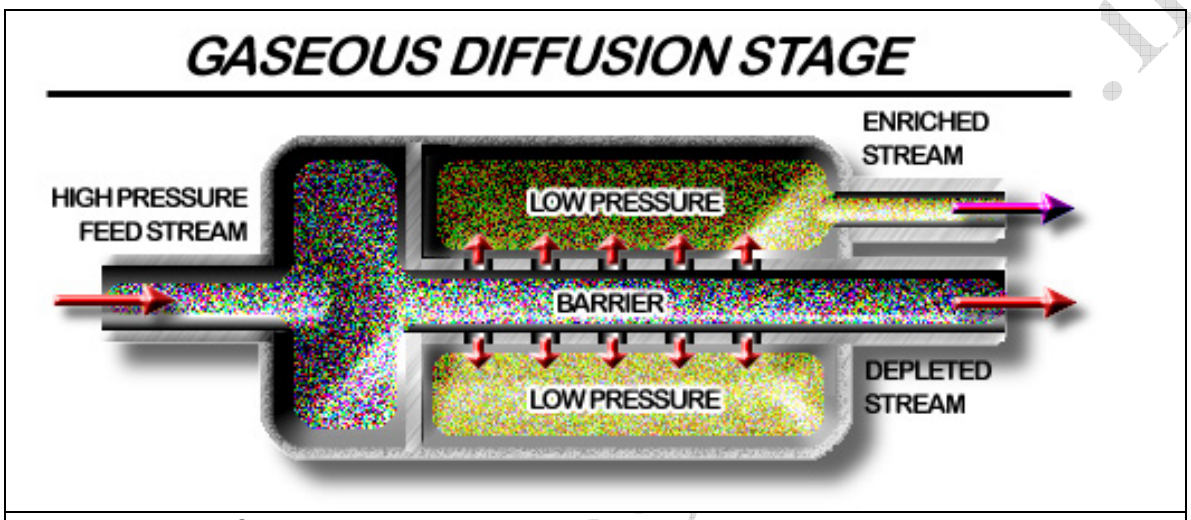
Η μέθοδος αυτή υπήρξε εξαιρετικά δημοφιλής τόσο για την παραγωγή HEU (οπλική βαθμίδα) όσο και για την παραγωγή LEU (καύσιμο αντιδραστήρων). Η πρώτη της χρήση έγινε στο 2ο παγκόσμιο πόλεμο από τις ΗΠΑ ενώ μετά τον πόλεμο χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την παραγωγή LEU μέχρι το 1992 που εγκαταλείφθηκε. Η Κίνα και η Γαλλία χρησιμοποιούν σήμερα GDIS εργοστάσια ενώ η Ρωσία έχει καταφύγει σε πιο ελκυστικές μεθόδους όπως αυτή της φυγοκέντρησης αερίου που θα αναλύσουμε παρακάτω. Η μέθοδος GDIS[15] στηρίζεται στο φαινόμενο του διαχωρισμού που υφίστανται τα μόρια ενός

---

[12] UN Special Commission
[13] Thermal Diffusion Isotope Separation
[14] Gaseous Diffusion Isotope Separation
[15] Το κλειδί για μια επιτυχημένη διάταξη GDIS είναι η πορώδης μεμβράνη διαχωρισμού. Το υλικό αυτό πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις :

Α) Οι πόροι πρέπει να είναι πολύ μικροί (διάμετρος της τάξης $10^{-8}m$) και ομοιόμορφου μεγέθους
Β) Η πυκνότητα των πόρων να είναι μεγάλη ώστε να επιτυγχάνεται μία υψηλή ροή δια μέσου του πετάσματος

αερίου καθώς αυτό διέρχεται μέσα από ένα πορώδες φράγμα. Τα ελαφρότερα μόρια του αερίου ταξιδεύουν ταχύτερα και συνεπώς τείνουν να συγκρούονται συχνότερα με τα μόρια του πορώδους φράγματος. Συνεπώς τα μόρια αυτά έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να διαπεράσουν το φράγμα από τα βαρύτερα. Για το UF_6 οι διαφορές στις ταχύτητες μεταξύ των μορίων που περιέχουν ^{235}U και ^{238}U είναι μικρές (της τάξης των 0,4%) και συνεπώς ο βαθμός διαχωρισμού είναι μικρός. Άρα ακόμη και για το ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού απαιτούνται πολλά διαδοχικά στάδια.



Η αρχή της μεθόδου GDIS.

Η μέθοδος GDIS είναι μάλλον ασύμφορη και απωθητική για τον εμπλουτισμό Ουρανίου αφού ενέχει πολλές δυσκολίες όπως η παραγωγή καταλλήλων μεμβρανών, μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, απόκτηση εξειδικευμένων συσκευών κλπ.

Γ) Η μεμβράνη πρέπει να είναι ανθεκτική στη διαβρωτική δράση του αερίου UF_6.

Συνήθη υλικά για τη μεμβράνη είναι οξείδια του Νικελίου και του Αλουμινίου.

Η διάταξη της μεθόδου GDIS είναι ογκώδης και ενεργοβόρα. Αποτελείται από τις εξής συνιστώσες:

Α) Μετατροπέας (Ένα μεγάλο κυλινδρικό δοχείο που περιέχει το πέτασμα).

Β) Συμπιεστής (Μία συσκευή οποία θα εξασκήσει την απαιτούμενή πίεση στο αέριο για να διαπεράσει το πέτασμα).

Γ) Ηλεκτρικός κινητήρας (Ο κινητήρας αυτός δίνει την απαραίτητη ενέργεια στο συμπιεστή)

Δ) Απαγωγός θερμότητας (Απαιτείται για την απομάκρυνση της θερμότητας από το συμπιεστή).

Ε) Βαλβίδες και σωληνώσεις

Η διάταξη πρέπει να είναι αεροστεγής και ιδιαίτερα ο συμπιεστής έτσι ώστε να μην υπάρχει εκροή αερίου ούτε εισροή αέρα.

Τα υλικά που εκτίθενται στην διαβρωτική δράση του UF_6 (σωληνώσεις, συμπιεστές κλπ.) πρέπει να είναι ανθεκτικά και όπως αναφέραμε αυτά είναι κυρίως Νικέλιο και Αλουμίνιο. Ασφαλώς, μια μεγάλης κλίμακας διαδικασία εμπλουτισμού Ουρανίου με την μέθοδο GDIS θα απαιτούσε και βοηθητικές διατάξεις όπως εκτεταμένο δίκτυο διανομής ενέργειας, πύργοι ψύξης για τα θερμά απόβλητα αέρια του συμπιεστή, εγκαταστάσεις φθορίωσης, εργοστάσιο παραγωγής μεμβρανών κλπ.

4) Φυγοκέντρηση αερίου (GCIS) [16]

Αν και η μέθοδος αυτή εγκαταλείφθηκε στη μέση του σχεδίου Manhattan μέχρι σήμερα έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη και θεωρείται μία από τις ελκυστικότερες μεθόδους εμπλουτισμού ουρανίου (LEU και HEU) εξ' αιτίας της μικρής ενεργειακής κατανάλωσης και της απλότητάς της.

Στη μέθοδο αυτή αέριο UF_6 διοχετεύεται σε ένα κύλινδρο, ο οποίος βρίσκεται σε κενό, και περιστρέφεται με μεγάλες ταχύτητες με τη βοήθεια ενός κινητήρα. Εξ' αιτίας της περιστροφής αυτής, η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται πάνω στα μόρια του αερίου τα αναγκάζει να συγκεντρωθούν με τη μορφή ενός λεπτού στρώματος στα τοιχώματα του κυλίνδρου και να ακολουθήσουν την ταχύτητα του τοιχώματος. Ασφαλώς τα βαρύτερα μόρια $^{238}UF_6$ θα συγκεντρωθούν πιο κοντά στα τοιχώματα από τα ελαφρύτερα $^{235}UF_6$ και έτσι επιτυγχάνεται ο ισοτοπικός διαχωρισμός[17].

Ασφαλώς λόγω της διαβρωτικής δράσης του UF_6 θα πρέπει και στη μέθοδο αυτή όλα τα υλικά να έχουν επένδυση με ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά. Κάθε μονάδα φυγοκέντρησης έχει μια συγκεκριμένη απόδοση που εξαρτάται κυρίως από τις διαστάσεις του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και την ταχύτητά περιστροφής. Συνεπώς κυλινδρικοί κινητήρες μεγάλου μήκους και μεγάλης ταχύτητας περιστροφής αναμένεται να είναι ένα στοιχείο που θα επιδιώξει η επίτοκος χώρα.

Η ταχύτητα του κινητήρα είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας αφού έχει κάποιο όριο το οποία επιβάλλεται κυρίως από την αντοχή του κινητήρα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τον κινητήρα είναι κράματα Αλουμινίου και Τιτανίου

www.armscontrol.info

[16] Gaseous Centrifuge Isotope Separation

[17] Η διάταξη αποτελείται από τις εξής συνιστώσες:
α) Κυλινδρικό κινητήρα , δοχεία συλλογής και χοάνες
β) Άνω και κάτω σύστημα υποστήριξης και ανάρτησης
γ) Ηλεκτρικό κινητήρα και πηγή ενέργειας
δ) Συσκευή παραγωγής κενού.

Τυπική συσκευή εμπλουτισμού ουρανίου που βασίζεται στη φυγοκέντρηση αερίου

www.atrol.info

Ακόμη υπάρχουν και άλλες μέθοδοι πιο σύγχρονες αλλά για λόγους οικονομίας χώρου και χρόνου απλώς θα τις αναφέρουμε:

Αεροδυναμικός διαχωρισμός (AIS)[18]
Διαχωρισμός με LASER (LIS)[19]
Διαχωρισμός πλάσματος (PIS)[20]

[18] Aerodynamic Isotope Separation
[19] Laser Isotope Separation
[20] Plasma Isotope Separation

Προφανώς όλες οι παραπάνω διαδικασίες εμπλουτισμού έχουν ως υποπροϊόν το DU το οποίο αν και έχει 40% λιγότερη ραδιενέργεια από μια αντίστοιχη ποσότητα μεταλλεύματος Ουρανίου δεν παύει να έχει όλες τις φυσικοχημικές ιδιότητες του καθαρού Ουρανίου. Μπορούμε τώρα να δώσουμε τον τεχνικό ορισμό που έχει δοθεί από την Επιτροπή Πυρηνικών Κανονισμών[21] σύμφωνα με την οποία

Εκφυλισμένο Ουράνιο (DU) ονομάζεται το Ουράνιο που περιέχει το ισότοπο ${}^{235}_{92}U$ σε αναλογία μικρότερη από 0,711% κ.β.

Οι προδιαγραφές των οπλικών συστημάτων DU του αμερικανικού υπουργείου αμύνης επιβάλουν περιεκτικότητα ${}^{235}_{92}U$ στο DU μικρότερη από 3%. Ουσιαστικά όμως κανένα DU πυρομαχικό των ΗΠΑ δεν περιέχει ποσότητα ${}^{235}_{92}U$ μεγαλύτερη από 2%.

---

[i] Edgardo Browne and Richard B. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes* (New York: John Wiley, 1986).
[ii] Steve Fetter, "Nuclear Archaeology: Verifying Declarations of Fissile-material Production," *Science and Global Security***,** Vol. 3, Nos. 3–4 (1993), p. 257.
[iii] *Health and Environmental Consequences of Depleted Uranium Use in the U.S. Army: Technical Report* (Atlanta: U.S. Army Environmental Policy Institute, June 1995), http://aepi.gatech.edu/DU/chapter2.html
[iv] Malcolm Rifkind , Υπουργός Άμυνας της Αγγλίας "The work of the UNSCOM in Iraq", (The Guardian, London, 28 June 1996)

www.armscontrol.info

---

[21] Nuclear Regulatory Commission