



Πλουτώνιο

Το χημικό στοιχείο **πλουτώνιο** (λατινικά: *plutonium*) είναι ένα μεταυράνιο, ραδιενεργό μέταλλο που ανήκει στις ακτινίδες. Ο ατομικός αριθμός του είναι 94 και η ατομική μάζα του 244 amu.^[2] Το χημικό του σύμβολο είναι "**Pu**" και ανήκει στην περίοδο 7 και στον τομέα f. Έχει θερμοκρασία τήξης 639,5±2 °C και θερμοκρασία βρασμού 3235±19 °C.

Στις «συνηθισμένες συνθήκες», θερμοκρασία 25 °C και πίεση 1 atm, είναι ένα μέταλλο σε χρώμα μεταλλικό γκρι, που αμαυρώνεται γρήγορα στον ατμοσφαιρικό αέρα, εξαιτίας της οξείδωσής του. Απαντάται σε έξι αλλοτροπικές μορφές, σε θερμοκρασίες από δωματίου (20 °C) έως και 640 °C, που είναι και το σημείο τήξης του. Οι αλλοτροπικές μεταπτώσεις του πλουτωνίου συνοδεύονται από ασυνεχείς μεταβολές στην πυκνότητά του. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του είναι ότι με θέρμανση, από τους 310 °C στους 480 °C συστέλλεται αντί να διαστέλλεται, όπως συμβαίνει με τα άλλα μέταλλα. Στις ενώσεις του εμφανίζεται με πέντε αριθμούς οξείδωσης. Αντιδρά με τον άνθρακα, τα αλογόνα, το άζωτο και το πυρίτιο. Όταν εκτίθεται στον υγρό αέρα, δημιουργεί οξείδια και υδρίδια τα οποία αυξάνουν τον όγκο της αρχικής ποσότητας πλουτωνίου έως και 70%. Στη συνέχεια αποφλοιώνεται και μετατρέπεται σε σκόνη, που μπορεί να αναφλεχθεί απότομα. Είναι ραδιενεργό δηλητήριο που συσσωρεύεται στον μυελό των οστών. Αυτές και άλλες ιδιότητες κάνουν τη διακίνηση του πλουτωνίου επικίνδυνη.

Το πλουτώνιο, ειδικότερα το ισότοπο ²³⁸Pu, παρασκευάστηκε με ακτινοβόληση ουρανίου με πυρήνες δευτερίου (βαρύ υδρογόνο) και απομονώθηκε για πρώτη φορά τον Δεκέμβριο του 1940, ενώ ταυτοποιήθηκε χημικά λίγο αργότερα, τον Φεβρουάριο του 1941 από τους Γκλεν Σήμποργκ, Έντουιν Μακ Μίλλαν, Γκόζεφ Κέννεντι και Άρθουρ Γουόλ. Το νέο στοιχείο πήρε το όνομα του πλανήτη-νάνο Πλούτωνα, παρόμοια με άλλα χημικά στοιχεία που ανήκουν στις ακτινίδες, δηλαδή το ουράνιο και το ποσειδώνιο, που πήραν τα ονόματά τους από τον πλανήτη Ουράνο και τον πλανήτη Ποσειδώνα. Παράγεται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες με πρώτη ύλη το ουράνιο που χρησιμοποιείται ως καύσιμη ύλη. Χρησιμοποιείται στους αντιδραστήρες και στην κατασκευή πυρηνικών όπλων σχάσης.

Ιστορία

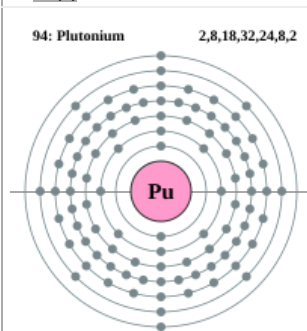
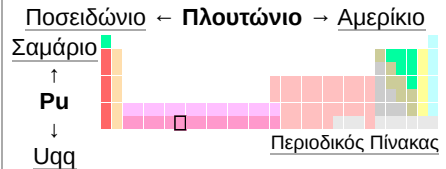
Ανακάλυψη

Ο Ενρίκο Φέρμι και μία ομάδα επιστημόνων στο Πανεπιστήμιο της Ρώμης ανέφεραν ότι είχαν ανακαλύψει το στοιχείο 94 το 1934.^[3] Ο Φέρμι αποκαλούσε το στοιχείο *εσπέριο* (*hesperium*) και το ανέφερε στη διάλεξή του κατά την απονομή του βραβείου Νόμπελ το 1938.^[4] Το δείγμα ήταν στην πραγματικότητα ένα μείγμα από βάριο, κρυπτό και άλλα στοιχεία, μα αυτό δεν ήταν γνωστό εκείνη την εποχή γιατί η πυρηνική σχάση δεν είχε ανακαλυφθεί ακόμη^[5].

Το πλουτώνιο (ακριβέστερα το ισότοπο ²³⁸Pu) παράχθηκε και απομονώθηκε για πρώτη φορά στις 14 Δεκεμβρίου 1940 και εντοπίστηκε χημικά στις 23 Φεβρουαρίου 1941 από τους Γκλεν Σίμποργκ (*Glenn Theodore Seaborg*, 1912 – 1999), Έντουιν Μ. ΜακΜίλαν (*Edwin Mattison McMillan*, 1907 – 1991), Τζώζεφ Κένεντι (*Joseph William Kennedy*, 1916 – 1957) και Άρθουρ Γουόλ (*Arthur C. Wahl*, 1917 – 2006), με βομβαρδισμό ουρανίου με πυρήνες δευτερίου σε κύκλοτρο 60 ιντσών (152,4 cm) στο πανεπιστήμιο του Μπέρκλεϋ στην Καλιφόρνια.^[6] Στο πείραμα του 1940, το ποσειδώνιο-238 δημιουργήθηκε άμεσα από τον βομβαρδισμό αλλά διασπάσθηκε με εκπομπή β-σωματιδίων δύο μέρες αργότερα, με την οποία σχηματίστηκε και το νέο στοιχείο 94.^[7]

Το έγγραφο που τεκμηριώνει την ανακάλυψη συντάχθηκε από την επιστημονική ομάδα και στάλθηκε στο περιοδικό *Physical Review* τον Μάρτιο του 1941.^[7] Το έγγραφο αποσύρθηκε πριν από τη δημοσίευσή του όταν διαπιστώθηκε ότι ένα ισότοπο του νέου στοιχείου (το ²³⁹Pu) θα μπορούσε να υποστεί πυρηνική σχάση με τέτοιο τρόπο που θα μπορούσε να γίνει χρήσιμο στην ατομική βόμβα. Η δημοσίευση καθυστέρησε έως ένα χρόνο μετά τη λήξη του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου για λόγους ασφαλείας^[8].

Πλουτώνιο



Κομμάτι καθαρού πλουτωνίου

Ιστορία

Ανακαλύφθηκε από τους Γκλεν Θ. Σίμποργκ, Άρθουρ Γουόλ, Ιωσήφ Γ. Κένεντι, Έντουιν ΜακΜίλλαν το 1940 - 1941

Ταυτότητα του στοιχείου

Όνομα, σύμβολο	Πλουτώνιο (Pu)
Ατομικός αριθμός (Z)	94
Κατηγορία	Μέταλλα, ακτινίδες
ομάδα, περίοδος, τομέας	- ,7, f
Σχετική ατομική μάζα (A _r)	244 g/mol
Ηλεκτρονική διαμόρφωση	[Rn] 5f ⁶ 7s ²
Αριθμός EINECS	231-117-7
Αριθμός CAS	7440-07-5

Ατομικές ιδιότητες

Ατομική ακτίνα	159 pm
Ομοιοπολική ακτίνα	187 pm
Ηλεκτραρνητικότητα	1,28
Κυριότεροι αριθμοί οξείδωσης	+7, +6, +5, +4, +3
Ενέργειες ιονισμού	1η: 584,7 kJ/mol

Φυσικά χαρακτηριστικά

Κρυσταλλικό σύστημα	μονοκλινές
Σημείο τήξης	912,5 K, 639,4 °C, 1182,9 °F

Ο Έντουιν Μακ Μίλαν είχε πρόσφατα ονομάσει το πρώτο υπερουράνιο στοιχείο με το όνομα του πλανήτη Ποσειδώνα και πρότεινε το εν λόγω στοιχείο 94, που είναι το επόμενο στοιχείο της σειράς, να πάρει το όνομά του από τον επόμενο πλανήτη, τον Πλούτωνα^{[9][Σημ. 1]} Ο Σίμποργκ αρχικά θεώρησε πως το όνομα του στοιχείου θα ήταν "plutium", "πλούτιο", αλλά στη συνέχεια έκρινε πως δεν ακουγόταν ηχητικά τόσο καλά όσο το "plutonium", "πλουτώνιο".^[10] Επέλεξε τα γράμματα "Pu" ως αστείο, τα οποία πέρασαν χωρίς προειδοποίηση στον περιοδικό πίνακα.^[Σημ. 2] Εναλλακτικές ονομασίες δημιουργημένες από τον Σίμποργκ ήταν **ουλτίμιο** (*ultimium*) ή **εξτρέμιο** (*extremium*) λόγω της λανθασμένης πεποίθησης ότι βρήκαν το τελευταίο δυνατό χημικό στοιχείο στον περιοδικό πίνακα.^[11]

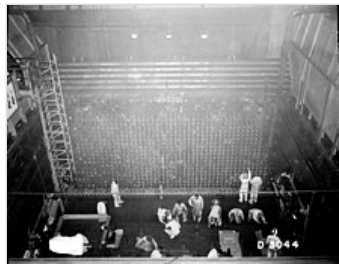
Πρώιμη Έρευνα

Η βασική χημεία του πλουτωνίου λίγους μήνες μετά την αρχική μελέτη έμοιαζε να έχει ομοιότητες με αυτήν του ουρανίου^[7]. Η πρωταρχική έρευνα συνεχίστηκε μυστικά στο μεταλλουργικό εργαστήριο του Πανεπιστημίου του Σικάγου. Στις 18 Αυγούστου του 1942 απομονώθηκαν και μετρήθηκαν για πρώτη φορά ίχνη πλουτωνίου. Περίπου 50 μg πλουτωνίου-239 παράχθηκαν αναμειγμένα με ουράνιο και άλλα προϊόντα σχάσης με αποτέλεσμα να απομονωθεί μόνο 1 μg καθαρού πλουτωνίου^[12]. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε στους χημικούς να καθορίσουν τη σχετική ατομική μάζα του νέου στοιχείου^{[13][Σημ. 3]}.

Τον Νοέμβριο του 1943, δείγμα τριφθοριούχου πλουτωνίου υπέστη αναγωγή με αποτέλεσμα τη δημιουργία του πρώτου δείγματος μεταλλικού πλουτωνίου - μερικά μικρογραμμάρια μεταλλικές χάντρες^[12] - αρκετά όμως για να χαρακτηριστεί ως το πρώτο συνθετικό στοιχείο που έγινε ορατό με γυμνό μάτι^[14].

Οι ραδιενεργές ιδιότητες του ²³⁹Pu μελετήθηκαν επίσης. Ερευνητές διαπίστωσαν ότι όταν χτυπηθεί από ένα νετρόνιο υφίσταται σχάση απελευθερώνοντας περισσότερα νετρόνια και ενέργεια. Αυτά τα νετρόνια μπορούν να συγκρουστούν με άλλα άτομα ²³⁹Pu και ούτω καθ' εξής σε μια, εκθετικού ρυθμού, ταχεία αλυσιδωτή αντίδραση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη αρκετά μεγάλη για να καταστρέψει μια πόλη εάν υπάρχει αρκετό συγκεντρωμένο ισότοπο ούτως ώστε να σχηματίσει μία κρίσιμη μάζα.^[7]

Παραγωγή κατά τη διάρκεια του σχεδίου Μανχάταν



Η πρόσοψη του Αντιδραστήρα Β του Χάνφορντ (Hanford) υπό κατασκευή - ο πρώτος αντιδραστήρας παραγωγής πλουτωνίου.

Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου η κυβέρνηση των Η.Π.Α. έθεσε σε εφαρμογή το Σχέδιο Μανχάταν, το οποίο είχε στόχο την ανάπτυξη ατομικής βόμβας. Οι τρεις βασικές περιοχές έρευνας και παραγωγής του Σχεδίου ήταν η εγκατάσταση παραγωγής πλουτωνίου εκεί που είναι τώρα η τοποθεσία Χάνφορντ, οι εγκαταστάσεις εμπλουτισμού ουρανίου στο Όακ Ριτζ και το Τενεσί, για τις έρευνες των όπλων σε ένα εργαστήριο σχεδιασμού γνωστό σήμερα ως Εθνικό Εργαστήριο του Λος Άλαμος.^[15]

Ο πρώτος αντιδραστήρας παραγωγής πλουτωνίου-239 ήταν ο Αντιδραστήρας γραφίτη X-10. Κατασκευάστηκε το 1943 σε μια εγκατάσταση στην Όακ Ριτζ (Oak Ridge) που αργότερα έγινε το Εθνικό Εργαστήριο Όακ Ριτζ.^{[7][Σημ. 4]}

Στις 5 Απριλίου 1944, ο Εμίλιο Τζίνο Σεγκρέ (Emilio Gino Segrè) στο Λος Άλαμος (Los Alamos) έλαβε το πρώτο δείγμα από αντιδραστήρα παραγωγής πλουτωνίου στο Όακ Ριτζ^[16]. Εντός δέκα ημερών, ο Σεγκρέ ανακάλυψε ότι ο τροφοδοτούμενος με πλουτώνιο αντιδραστήρας είχε υψηλότερη συγκέντρωση στο ισότοπο πλουτώνιο-240 από το πλουτώνιο που παραγόταν από το κύκλοτρο. Το πλουτώνιο-240 έχει ρυθμό υψηλής αυθόρμητης σχάσης, αυξάνοντας το συνολικό επίπεδο του υποβάθρου νετρονίων του δείγματος πλουτωνίου. Ως αποτέλεσμα, η αρχική βόμβα πλουτωνίου 'τύπου όπλου' με το κωδικό όνομα "Thin Man" έπρεπε να εγκαταλειφθεί, καθώς ήταν πιθανή πρόωρη πυρηνική έκρηξη λόγω του αυξημένου πλήθους αυθόρμητων νετρονίων.

Η κατασκευή του Αντιδραστήρα Β του Hanford, του πρώτου βιομηχανικού μεγέθους πυρηνικού αντιδραστήρα για παραγωγικούς σκοπούς, ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 1945. Ο Αντιδραστήρας Β παρήγαγε το σχάσιμο υλικό για τα όπλα πλουτωνίου που χρησιμοποιείτο κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου.^[Σημ. 5]

Σημείο βρασμού	3505 K, 3228 °C, 5842 °F
Πυκνότητα	19,816 g/cm ³
Ενθαλπία τήξης	2,82 KJ/mol
Ενθαλπία εξάτμισης	333,5 KJ/mol
Ειδική θερμοχωρητικότητα (25 °C)	35,5 J/(mol·K)
Μαγνητική συμπεριφορά	παραμαγνητικό ^[1]
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	(0 °C) 1,460 μΩ·m
Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	666667 S/m
Ειδική θερμική αγωγιμότητα	(27 °C) 6,74 W/(mK)
Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	96 GPa
Μέτρο διάτμησης (Shear modulus)	43 GPa
Λόγος Poison	0,21
Ταχύτητα του ήχου	2260 m/s
Επικινδυνότητα	
<div><div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div><div><div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div></div></div></div></div> <div>Η κατάσταση αναφοράς είναι η πρότυπη κατάσταση (25°C, 1 Atm) εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά</div>	



Ο Γκλεν Θ. Σίμποργκ και η ομάδα του στο Μπέρκλεϊ ήταν οι πρώτοι που παρήγαγαν πλουτώνιο

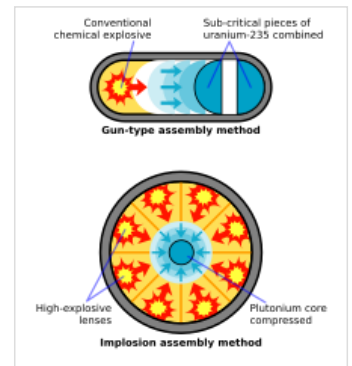
Οι αντιδραστήρες Β, Γ και Δ ήταν οι αρχικοί αντιδραστήρες που ήταν χτισμένοι στο Hanford και έξι επιπλέον αντιδραστήρες παραγωγής πλουτωνίου χτίστηκαν αργότερα σε αυτόν τον χώρο.

Το 2004, ένα χρηματοκιβώτιο ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια των ανασκαφών μιας τάφρου ενταφιασμών στο πυρηνικό εργοστάσιο Hanford. Μέσα στο χρηματοκιβώτιο υπήρχαν διάφορα αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένης και μιας μεγάλης γυάλινης φιάλης που περιείχε μέσα έναν υπόλευκο πολτό ο οποίος στη συνέχεια προσδιορίστηκε ως το παλαιότερο γνωστό στρατιωτικό δείγμα πλουτωνίου. Η ισοτοπική ανάλυση από το Νοτιότερο Εργαστήριο του Ειρηνικού ωκεανού ανέφερε ότι το πλουτώνιο στη φιάλη παρασκευάστηκε από τον Αντιδραστήρα Χ-10 στο Όακ Ριτζ κατά τη διάρκεια του 1944.^{[17][18][19]}

Ατομικές βόμβες τύπου Trinity και «Fat Man»

Η πρώτη δοκιμή ατομικής βόμβας, με το κωδικό όνομα Trinity έγινε στις 16 Ιουλίου του 1945, κοντά στο Αλαμογκόρντο του Νέου Μεξικού και χρησιμοποιήθηκε πλουτώνιο ως σχάσιμο υλικό.^[12] Το σχέδιο κατάρρευσης του «Gadget», η κωδική ονομασία που δόθηκε στην Τριάδα, χρησιμοποιούσε συμβατικά εκρηκτικά-φακούς για να συμπιέσει μια σφαίρα πλουτωνίου σε υπερκρίσιμη μάζα, η οποία ταυτόχρονα ακτινοβολήθηκε με νετρόνια από το «Urchin», έναν εσωτερικό εκκινητή νετρονίων από πολώνιο και βηρύλλιο (πηγή νετρονίων: (α, n) αντίδραση).^[7] Μαζί, αυτά εξασφάλιζαν μια ανεξέλεγκτη αλυσιδωτή αντίδραση και την έκρηξη. Το όπλο, στο σύνολό του, ζύγιζε περίπου 4 τόνους, αν και χρησιμοποιούσε 6,2 kg πλουτωνίου στον πυρήνα του.^[20] Περίπου 20% του πλουτωνίου που χρησιμοποιήθηκε στο όπλο «Τριάδα» είχε σχασθεί με αποτέλεσμα έκρηξη ισοδύναμη με 20.000 τόνους TNT.^{[21][Σημ. 6]}

Πανομοιότυπος σχεδιασμός χρησιμοποιήθηκε στην ατομική βόμβα "Fat Man", η οποία εξερράγη στο Ναγκαασάκι (Ιαπωνία) στις 9 Αυγούστου 1945, σκοτώνοντας 70.000 ανθρώπους και τραυματίζοντας άλλους 100.000.^[7] Η βόμβα «Little Boy» εξερράγη στη Χιροσίμα, 3 μέρες νωρίτερα, και εκεί χρησιμοποιήθηκε ουράνιο-235, όχι πλουτώνιο. Η Ιαπωνία παραδόθηκε στις 15 Αυγούστου και μόνο μετά την ανακοίνωση για τις πρώτες ατομικές βόμβες η παρουσία του πλουτωνίου έγινε γνωστή δημοσίως.

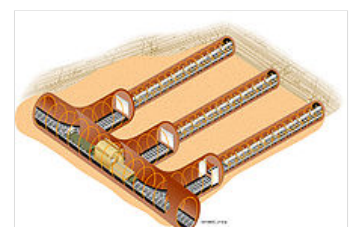


Εξαιτίας της παρουσίας του πλουτωνίου-240 στο προερχόμενο από αναπαραγωγικό αντιδραστήρα πλουτώνιο, ο σχεδιασμός κατάρρευσης αναπτύχθηκε μόνο για τις βόμβες τύπου «Fat Man» και «Trinity».

Χρήση και απόβλητα ψυχρού πολέμου

Μεγάλα αποθέματα πλουτωνίου δημιουργήθηκαν για στρατιωτική χρήση, τόσο από τη Σοβιετική Ένωση (Ε.Σ.Σ.Δ.) όσο και από τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου. Οι αντιδραστήρες των Η.Π.Α. στο Hanford και στην Περιοχή Σαβάννα Ρίβερ (Savannah River Site) στη Νότια Καρολίνα παρήγαγαν 103 τόνους,^[22] και περίπου 170 τόνοι πλουτωνίου βαθμού-όπλων παρήχθησαν στη Ρωσία.^{[23][Σημ. 7]} Κάθε χρόνο 20 τόνοι από το στοιχείο εξακολουθούν να παράγονται ως υποπροϊόν της βιομηχανίας πυρηνικής ενέργειας.^[24] Τουλάχιστον 1000 τόνοι πλουτωνίου ενδέχεται να υπάρχουν με περισσότερους από 200 από αυτούς, είτε να βρίσκονται μέσα σε πυρηνικά όπλα, είτε να έχουν αφαιρεθεί από αυτά.^[7] Η εκτίμηση του ινστιτούτου SIPRI για τα παγκόσμια αποθέματα πλουτωνίου το 2007 ήταν 500 τόνοι, εξίσου κατανεμημένοι μεταξύ στρατιωτικών και μη στρατιωτικών αποθεμάτων.^[25]

Από το τέλος του ψυχρού πολέμου, αυτά τα αποθέματα προκαλούν ανησυχία για την εξάπλωση πυρηνικών όπλων. Στις ΗΠΑ, μέρος του πλουτωνίου από αποσυναρμολογημένα πυρηνικά όπλα τήχθηκε σε κυλινδρικούς σχηματισμούς γυαλιού από οξείδιο του πλουτωνίου συνολικά δύο τόνων.^[7] Το γυαλί αποτελείται από τα βοροπυριτικά που αναμιγνύονται με το κάδμιο και το γαδολίνιο.^[Σημ. 8] Το γυαλί αυτό προγραμματίστηκε να εγκιβωτιστεί σε ανοξείδωτο χάλυβα και να αποθηκευτεί τουλάχιστον 4 χιλιόμετρα υπογείως μέσα σε οπές που θα καλυφτούν στη συνέχεια με σκυρόδεμα.^[7] Από το 2008, το μόνο κέντρο στις Η.Π.Α. που είχε προγραμματιστεί για την αποθήκευση του πλουτωνίου ήταν η αποθήκη πυρηνικών αποβλήτων στα βουνά Yucca, η οποία είναι 160 χλμ. βορειοανατολικά του Λας Βέγκας, στη Νεβάδα.^[26] Οι τοπικές και κρατικές αντιθέσεις σε αυτό το σχέδιο καθυστέρησαν τις προσπάθειες για την αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων στο βουνό Yucca. Τον Μάρτιο του 2010, το Τμήμα Ενέργειας απέσυρε την αίτηση αδειών του για την αποθήκη στα βουνά Yucca και διέκοψε τη χρηματοδότηση του Γραφείου Πολιτικής Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων, το οποίο είχε διαχειριστεί την περιοχή βουνών Yucca για 25 έτη.



Προτεινόμενο σχέδιο σηράγγων αποθήκευσης αποβλήτων στα βουνά Yucca.

Ιατρικοί πειραματισμοί

Κατά τη διάρκεια και μετά το τέλος του Δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου, οι επιστήμονες που συμμετείχαν στο Πρόγραμμα Μανχάταν και άλλα ερευνητικά προγράμματα πυρηνικών όπλων, διεξήγαγαν έρευνες για τα αποτελέσματα του πλουτωνίου σε εργαστηριακά ζώα και ανθρώπους.^[27] Μελέτες σε ζώα έδειξαν ότι η θανατηφόρος δόση είναι μερικά mg πλουτωνίου ανά χιλιόγραμμο ιστού.^[28]

Στην περίπτωση ανθρώπων, τα πειράματα περιλάμβαναν ένεση διαλύματος που περιείχε (συνήθως) 5μg πλουτωνίου σε ασθενείς με ανιάτες ασθένειες ή ασθενείς που είχαν προσδόκιμο ζωής μικρότερο των 10 ετών, είτε λόγω ηλικίας, είτε λόγω χρόνιων ασθενειών.^[27] Η δόση αυτή μειώθηκε στο 1μg τον Ιούλιο του 1945 μετά τις μελέτες σε ζώα που έδειξαν ότι ο τρόπος που το πλουτώνιο κατανέμεται στα οστά είναι πιο επικίνδυνος από τον τρόπο που κατανέμεται το ράδιο.^[28]

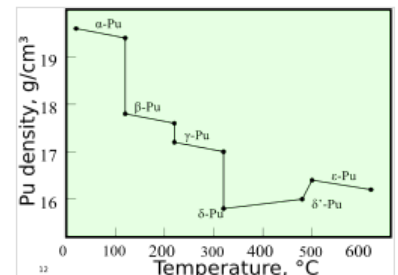
Σε 18 άτομα έγινε ένεση με πλουτώνιο χωρίς τη συναίνεσή τους. Τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των πρότυπων ασφαλείας κατά τον χειρισμό πλουτωνίου.^[27]

Τα περιστατικά αυτά πλέον θεωρούνται σοβαρή παραβίαση της ιατρικής δεοντολογίας και του όρκου του Ιπποκράτη. Λιγότερο επικριτικοί σχολιαστές σημείωσαν ότι, παρά την παραβίαση ηθικής και εμπιστοσύνης, "τα αποτελέσματα των ενέσεων πλουτωνίου δεν προκάλεσαν τόσο ζημιά στους ασθενείς όση αρχικά υποστήριζαν τα νέα, ούτε ήταν τόσο σημαντικά όσο υποστήριζαν πολλοί επιστήμονες τότε και τώρα."^[29]

Χαρακτηριστικά

Φυσικά χαρακτηριστικά

Το πλουτώνιο, όπως και άλλα πολλά μέταλλα, έχει ασημένια εμφάνιση σαν το νικέλιο, αλλά οξειδώνεται πολύ γρήγορα, δημιουργώντας γκρίζο, κίτρινο, ή πράσινο στο χρώμα της ελιάς οξειδίου.^{[30][31]} Σε θερμοκρασία δωματίου το πλουτώνιο είναι στην α-μορφή που είναι και η πιο κοινή δομική μορφή του στοιχείου. Η α-μορφή είναι τόσο εύθρυπτη, όσο και ο γκρίζος χυτοσίδηρος, εκτός κι αν είναι κράμα με άλλα μέταλλα οπότε γίνεται μαλακή και όλκιμη. Σε αντίθεση με άλλα μέταλλα, το πλουτώνιο, δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και της θερμότητας. Έχει χαμηλό σημείο τήξης (640 °C), και ασυνήθιστα υψηλό σημείο βρασμού (3327 °C).^[30]



Μεταβολές της πυκνότητας του Pu σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Η εκπομπή σωματιδίων α, που είναι υψηλής ενέργειας πυρήνες ηλίου, είναι η πιο γνωστή μορφή ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το πλουτώνιο.^[32] Ένας τυπικός πυρήνας πυρηνικού όπλου 5 Kg περιέχει $12,5 \times 10^{24}$ άτομα. Με χρόνο ημιζωής 24.100 χρόνια, περίπου $11,5 \times 10^{12}$ από τα άτομα του διασπώνται κάθε δευτερόλεπτο εκπέμποντας σωματίδια-α των 5,157 MeV. Η θερμότητα που παράγεται με την επιβράδυνση α - σωματιδίων, κάνει το Pu ζεστό στην αφή.^{[9][33]}

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι ένα μέτρο του πόσο έντονα ένα υλικό αντιστέκεται στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πλουτωνίου σε θερμοκρασία δωματίου είναι πολύ μεγάλη για ένα μέταλλο, και γίνεται όλο και πιο μεγάλη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τα άλλα μέταλλα.^[34] Η τάση αυτή συνεχίζεται μέχρι τους 100 K κάτω από τους οποίους, η αντίσταση μειώνεται γρήγορα για πρόσφατες ποσότητες πλουτωνίου.^[34] Μετά, στους 20 K περίπου, η αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται με τον χρόνο πράγμα που οφείλεται στις απώλειες μάζας που δημιουργεί η ακτινοβόληση. Αυτή η αύξηση της αντίστασης, εξαρτάται από την ισοτοπική σύσταση του μελετούμενου δείγματος.^[34]

Λόγω της εκπομπής ακτινοβολίας, καταστρέφεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πλουτωνίου, δηλαδή διαταράσσεται η κανονική διάταξη των ατόμων του με τον χρόνο.^[35] Ωστόσο, η ραδιοεκπομπή μπορεί να οδηγήσει επίσης σε ανόπτηση που εξουδετερώνει κάποιες από τις επιπτώσεις καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από τους 100 K.^[36]

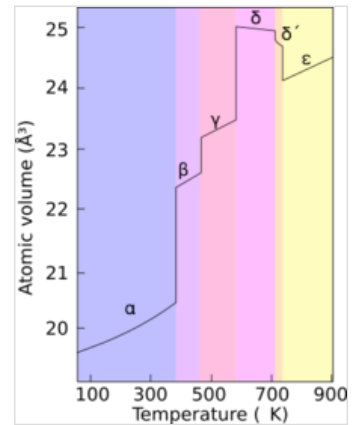
Σε αντίθεση με άλλα υλικά, το πλουτώνιο "αυξάνει" την πυκνότητά του όταν τήκεται, κατά 2,5 %, αλλά το υγρό μέταλλο δείχνει μία γραμμική μείωση της πυκνότητας με τη θερμοκρασία.^[34] Κοντά στο σημείο τήξης του, το πλουτώνιο έχει επίσης πολύ μεγάλο ιξώδες και επιφανειακή τάση σε σύγκριση με άλλα μέταλλα.^[35]

Αλλοτροπικές μορφές

Το πλουτώνιο κανονικά έχει έξι αλλοτροπικές μορφές και διαθέτει άλλη μια έβδομη, τη ζήτα, ζ, σε υψηλή θερμοκρασία και περιορισμένο εύρος πιέσεων.^[37] Αυτές οι αλλοτροπικές μορφές έχουν παρόμοιες εσωτερικές ενέργειες, αλλά διαφέρουν σημαντικά οι πυκνότητες και τα κρυσταλλικά πλέγματά τους. Αυτό κάνει το πλουτώνιο πολύ ευαίσθητο σε μεταβολές θερμοκρασίας, πίεσης και χημικής κατάστασης, και μπορούν να συμβούν μεγάλες αλλαγές στον όγκο του κατά τη μετάβαση από τη μία αλλοτροπική μορφή στην άλλη.^[35] Οι διαλυτότητες των διαφόρων αλλοτρόπων κυμαίνονται από 16.00 g/cm³ έως 19.86 g/cm³.^[24]

Η παρουσία των αλλοτροπικών μορφών καθιστά τη μηχανική κατεργασία του πλουτωνίου πολύ δύσκολη, δεδομένου ότι αλλάζει κατάσταση πολύ εύκολα. Για παράδειγμα, η α-μορφή υπάρχει σε θερμοκρασία δωματίου από καθαρό πλουτώνιο. Έχει παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά με τον χυτοσίδηρο, όμως αλλάζει στην πλαστική και ελατή β-μορφή σε ελαφρά υψηλότερες θερμοκρασίες^[38]. Οι λόγοι για την πολύπλοκη φάση του διπλανού διαγράμματος δεν είναι πλήρως κατανοητοί. Η α-μορφή έχει μονοκλινή συμμετρία στην οποία οφείλεται και η ευθραυστότητα, ο εφελκυσμός, η συμπίεστότητα και η μικρή αγωγιμότητα^[37].

Η δ-μορφή του πλουτωνίου εμφανίζεται κανονικά από τους 310 °C έως τους 452 °C αλλά είναι σταθερή και σε θερμοκρασία δωματίου όταν είναι σε κράμα με μικρό ποσοστό γαλλίου, αργιλίου ή δημητρίου. Διευκολύνεται έτσι η μηχανική κατεργασία των κραμάτων αυτών και ενισχύονται οι συγκολλητικές τους ιδιότητες^[38]. Η δ-μορφή έχει περισσότερο τυπικό μεταλλικό χαρακτήρα, και είναι ανθεκτική και ελατή, όπως το αλουμίνιο^[37]. Σε πυρηνικά όπλα σχάσης, το ωστικό κύμα των εκρηκτικών χρησιμοποιείται για τη συμπίεση του πυρήνα πλουτωνίου, που θα προκαλέσει επίσης μετάβαση από τη συνηθισμένη δ-μορφή, στην πυκνότερη α-μορφή, συμβάλλοντας σημαντικά στην επίτευξη κρίσιμης μάζας που είναι απαραίτητη για την έναρξη της σχάσης και την έκρηξη του όπλου^[39]. Η ε-μορφή, που είναι στερεή μορφή υψηλής θερμοκρασίας, παρουσιάζει ανωμαλία υψηλής ατομικής αυτο-διάχισης σε σχέση με άλλα στοιχεία^[35].



Το πλουτάνιο εμφανίζεται με έξι αλλοτροπικές μορφές σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση (δηλ. 1 Atm): άλφα (α), βήτα (β), γάμμα (γ), δέλτα (δ), δέλτα prime (δ'), & έψιλον (ε)^[37]

Πυρηνική σχάση



Δακτυλίδι από 99,96 % καθαρό πλουτάνιο, αρκετό για μία πυρηνική βόμβα. Το δακτυλίδι έχει μάζα 5,3 Kg περίπου και έχει διάμετρο 11 cm

Το πλουτάνιο είναι ραδιενεργό μέταλλο των ακτινιδών και το ισότοπο ²³⁹Pu, είναι ένα από τα τρία βασικότερα σχάσιμα ισότοπα ^[8] (το ουράνιο-233 και το ουράνιο-235 είναι τα άλλα δύο)^[40] Το ²⁴¹Pu είναι κι αυτό εξαιρετικά σχάσιμο. Για να θεωρηθεί σχάσιμο ένα ισότοπο πρέπει ο πυρήνας του να είναι σε θέση να διασπαστεί ή να υποστεί σχάση όταν χτυπηθεί από βραδέως κινούμενο νετρόνιο, απελευθερώνοντας έτσι αρκετά επιπλέον νετρόνια και συντηρώντας την πυρηνική αλυσιδωτή αντίδραση.

Το πλουτάνιο-239 έχει πολλαπλασιαστικό παράγοντα (k) μεγαλύτερο από ένα, πράγμα που σημαίνει ότι αν συγκεντρωθεί επαρκής ποσότητα του μετάλλου και με την κατάλληλη γεωμετρία (π.χ. μία συμπιεσμένη σφαίρα), μπορεί να αποτελέσει κρίσιμη μάζα.^[41] Κατά τη διάρκεια της σχάσης, ένα μέρος της ενέργειας σύνδεσης, η οποία συγκρατεί τον πυρήνα συμπαγή, απελευθερώνεται με τη μορφή μεγάλης ποσότητας θερμικής, ηλεκτρομαγνητικής και κινητικής ενέργειας: ένα κιλό πλουτωνίου-239, μπορεί να παράγει έκρηξη ισοδύναμη με

20.000 τόνους TNT. Αυτή είναι η ενέργεια που κάνει το πλουτάνιο-239 χρήσιμο για πυρηνικά όπλα και πυρηνικούς αντιδραστήρες.

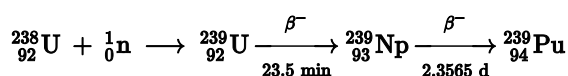
Η παρουσία του ισότοπου ²⁴⁰Pu σε ένα δείγμα, περιορίζει τις δυνατότητες της πυρηνικής βόμβας διότι αυτό έχει ένα σχετικά υψηλό ποσοστό αυθόρμητης σχάσης (~ 440 διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και ανά γραμμάριο, δηλαδή πάνω από 1000 νετρόνια ανά δευτερόλεπτο και ανά γραμμάριο^[42]), αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο πρόωρης έκρηξης^[43]. Το πλουτάνιο χαρακτηρίζεται ως "βαθμού" όπλων, καυσίμων ή αντιδραστήρα με βάση το ποσοστό πλουτωνίου-240 που περιέχει. Τα όπλα πλουτωνίου περιέχουν λιγότερο από 7 % πλουτάνιο-240. Το πλουτάνιο που προορίζεται για καύσιμο περιέχει από 7 % έως λιγότερο από 19 % πλουτάνιο-240 και το πλουτάνιο των αντιδραστήρων περιέχει 19 % ή περισσότερο πλουτάνιο-240. Το εμπλουτισμένο πλουτάνιο-239 όταν περιέχει λιγότερο από 4 % πλουτάνιο-240, χρησιμοποιείται στα όπλα του αμερικάνικου ναυτικού που προορίζονται για αποθήκευση, στα πλοία και στα υποβρύχια επειδή είναι λιγότερο ραδιενεργό.^[44] Το ισότοπο ²³⁸Pu δεν είναι σχάσιμο, αλλά μπορεί να υποστεί πυρηνική σχάση εύκολα με ταχέως κινούμενα νετρόνια, αλλά και α-διάσπαση^[9].

Ισότοπα και σύνθεση

Είκοσι ραδιενεργά ισότοπα του πλουτωνίου έχουν χαρακτηριστεί. Τα μακροβιότερα είναι το πλουτάνιο-244, με χρόνο ημιζωής 80,8 εκατομμύρια χρόνια, το πλουτάνιο-242 με ημιζωή 373.300 χρόνια και το πλουτάνιο-239 με ημιζωή 24.110 χρόνια. Τα υπόλοιπα ραδιοϊσότοπα έχουν ημιζωή λιγότερη από 7.000 χρόνια. Το πλουτάνιο έχει επίσης οκτώ μετασταθείς καταστάσεις, αν και καμμία δεν είναι σταθερή και όλες έχουν ημιζωή κάτω από ένα δευτερόλεπτο.^[32]

Οι μαζικοί αριθμοί των ισωτόπων του πλουτωνίου κυμαίνονται από 228 έως 247. Ο βασικός τρόπος διάσπασης των ισωτόπων με μαζικό αριθμό μικρότερο από το πιο σταθερό ισότοπο, το πλουτάνιο-244, είναι η αυθόρμητη σχάση και η εκπομπή α-σωματιδίων, ενώ, ως επί το πλείστον, τα προϊόντα διάσπασης είναι ισότοπα του ουρανίου (με 92 πρωτόνια) και του ποσειδωνίου (με 93 πρωτόνια) (αγνοώντας τους ενδιάμεσους θυγατρικούς πυρήνες που δημιουργούνται). Ο κύριος τρόπος διάσπασης για τα ισότοπα που έχουν μαζικό αριθμό μεγαλύτερο από το πλουτάνιο-244, είναι η εκπομπή β-σωματιδίων, ως επί το πλείστον όμως τα προϊόντα αποσύνθεσης αποτελούν τα ισότοπα του αμερίκιου (με 95 πρωτόνια). Το πλουτάνιο-241 είναι το μητρικό ισότοπο της ραδιενεργής σειράς του ποσειδωνίου, που αποσυντίθεται σε αμερίκιο-241, μέσω της εκπομπής β-σωματιδίων.^{[9][32]}

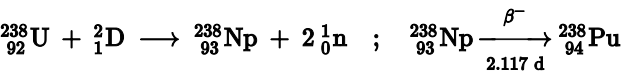
Το πλουτάνιο-238 και 239 είναι τα πιο κοινά από τα συνθετικά ισότοπα.^[9] Το πλουτάνιο-239 δημιουργείται με την ακόλουθη αντίδραση από ουράνιο (U) και νετρόνια (n), μέσω της διάσπασης βήτα (β⁻) με ποσειδώνιο (Np), ως ενδιάμεσο^[45]:



Τα νετρόνια από τη σχάση του ουρανίου-235 συλλαμβάνονται από τους πυρήνες του ουρανίου-238 για να σχηματίσουν το ουράνιο-239: η β-διάσπαση μετατρέπει ένα νετρόνιο σε ένα πρωτόνιο για να σχηματίσει το ποσειδώνιο-239 (ημιζωή 2,36 ημέρες) και άλλη μία β-διάσπαση σχηματίζει πλουτάνιο-239.^[46] Οι επιστήμονες που συμμετείχαν στο μυστικό Βρετανικό πρόγραμμα κατασκευής ατομικής βόμβας κατά τον

Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, είχαν προβλέψει αυτή την αντίδραση θεωρητικά το 1940.

Το πλουτώνιο-238 συντίθεται με βομβαρδισμό ουρανίου-238 με δευτερόνια (το D είναι ο πυρήνας του βαρέος υδρογόνου) στην ακόλουθη αντίδραση:^[47]



Σε αυτή τη διαδικασία, ένα δευτερόνιο χτυπά το ουράνιο-238 για να παράγει δύο νετρόνια και για να σχηματίσει το ποσειδώνιο-238, το οποίο διασπάται αυθόρμητα εκπέμποντας αρνητικά β-σωματίδια για να σχηματίσει το πλουτώνιο-238.

Θερμότητα διάσπασης και ιδιότητες σχάσης

Τα ισότοπα του πλουτωνίου υφίστανται ραδιενεργό διάσπαση, κατά την οποία παράγεται θερμότητα. Τα διαφορετικά ισότοπα παράγουν διαφορετική θερμότητα ανά μονάδα μάζας. Η θερμότητα διάσπασης εκφράζεται συνήθως ως W/Kg ή mW/g. Σε περίπτωση μεγαλύτερων κομματιών πλουτωνίου (όπως είναι π.χ. το τμήμα του όπλου που περιέχει το σχάσιμο υλικό) και ανεπαρκούς απαγωγής της θερμότητας, τα αποτελέσματα από την υπερθέρμανση μπορεί να είναι σημαντικά. Όλα τα ισότοπα κατά τη διάσπασή τους παράγουν ακτίνες γάμμα μικρής ενέργειας.

Η θερμότητα διάσπασης των ισωτόπων του πλουτωνίου^[48]

Ισότοπο	Είδος διάσπασης	Χρόνος ημιζωής (έτη)	Θερμότητα διάσπασης (W/kg)	Αυθόρμητη σχάση νετρόνια (1/(g·s))	Σχόλιο
<u>Pu-238</u>	άλφα διάσπαση δημιουργώντας <u>U-234</u>	87.74	560	2600	Πολύ υψηλή θερμότητα διάσπασης. Ακόμα και σε μικρές ποσότητες μπορεί να προκαλέσει σημαντική αυτοθέρμανση. Χρησιμοποιείται από μόνο του στις ραδιοϊσοτοπικές θερμοηλεκτρικές γεννήτριες.
<u>Pu-239</u>	άλφα διάσπαση δημιουργώντας <u>U-235</u>	24100	1.9	0.022	Το κύριο σχάσιμο ισότοπο που χρησιμοποιείται.
<u>Pu-240</u>	άλφα διάσπαση δημιουργώντας <u>U-236</u> , αυθόρμητη σχάση	6560	6.8	910	Η κύρια πρόσμειξη στο ²³⁹ Pu. Ο εμπλουτισμός σε πλουτώνιο αναφέρεται συνήθως σε ποσοστό πλουτωνίου-240. Η υψηλή αυθόρμητη σχάση παρεμποδίζει τη χρήση σε πυρηνικά όπλα.
<u>Pu-241</u>	βήτα διάσπαση δημιουργώντας <u>Am-241</u>	14.4	4.2	0.049	Διασπάται προς αμερίκιο-241: η συσσώρευσή του παρουσιάζει μεγάλο κίνδυνο από την ακτινοβολία στα παλιά δείγματα.
<u>Pu-242</u>	άλφα διάσπαση δημιουργώντας <u>U-238</u>	373.300	0.1	1700	

Το αμερίκιο, το προϊόν διάσπασης του πλουτωνίου-241, έχει διάρκεια ημιζωής 430 έτη, 1,2 αυθόρμητες σχάσεις ανά γραμμάριο και ανά δευτερόλεπτο, και θερμότητα διάσπασης 114 W/Kg. Καθώς η διάσπαση παράγει εξαιρετικά δεισδυτικές ακτίνες γάμμα, η παρουσία της στο πλουτώνιο προσδιοριζόμενη από την αρχική συγκέντρωση πλουτωνίου-241 και την ηλικία του δείγματος, αυξάνει την έκθεση στην ακτινοβολία του περιβάλλοντος χώρου και του προσωπικού που βρίσκεται κοντά.

Χημεία και ενώσεις του πλουτωνίου

Σε θερμοκρασία δωματίου, το καθαρό πλουτώνιο έχει ασημί χρώμα, αμαυρώνεται όμως όταν οξειδώνεται.^[24] Το στοιχείο εμφανίζεται στις ενώσεις του με πέντε αριθμούς οξείδωσης.^[24]

- Pu(III) ως Pu³⁺ (μπλε στο χρώμα της λεβάντας)
- Pu(IV) ως Pu⁴⁺ (κίτρινο με καφέ)
- Pu(V) ως PuO₂⁺ (ροζ?)^[Σημ. 9]
- Pu(VI) ως PuO₂²⁺ (ροζ με πορτοκαλί)
- Pu(VII) ως PuO₅³⁻ (πράσινο στο χρώμα της ελιάς. Το Pu(VII) είναι σπάνιο.

Το χρώμα που αποκτούν τα διαλύματα πλουτωνίου εξαρτάται από την οξειδωτική κατάσταση και τη φύση του όξινου ανιόντος.^[49] Το ανιόν αυτό μάλιστα, καθορίζει και τον τρόπο συναρμογής στα σύμπλοκα του πλουτωνίου, δηλαδή το πώς τα άτομα συνδέονται με το κεντρικό άτομο.



Διάφορες καταστάσεις οξείδωσης του πλουτωνίου σε διαλύματα

Το μεταλλικό πλουτώνιο παράγεται από την αντίδραση του τετραφθοριούχου πλουτωνίου με βάριο, ασβέστιο ή λίθιο στους 1200°C.^[50] Προσβάλλεται από οξέα, οξυγόνο και υδρατμούς, αλλά όχι από τα αλκάλια. Διαλύεται εύκολα στο υδροχλωρικό, το υδροϊωδικό και στο υπερχλωρικό οξύ.^[51] Το λιωμένο μέταλλο, πρέπει να φυλάσσεται σε κενό ή σε αδρανή ατμόσφαιρα για να αποφευχθεί η αντίδραση με τον αέρα.^[38] Στους 135 °C αναφλέγεται στον αέρα και εκρήγνυται αν τοποθετηθεί σε τετραχλωράνθρακα.^[7]



Το πυροφορικό πλουτώνιο λάμπει σαν λαμπερή στάχτη, υπό ορισμένες προϋποθέσεις



Είκοσι μικρογραμμάρια καθαρού υδροξειδίου πλουτωνίου. [καθαρό υδροξείδιο πλουτωνίου].[52]

Το πλουτώνιο είναι ένα δραστικό μέταλλο. Σε υγρό αέρα ή σε υγρό αργό, το μέταλλο οξειδώνεται ταχύτατα, παράγοντας ένα μείγμα οξειδίων και υδριδίων.^[30] Αν το μέταλλο εκτεθεί ένα μεγάλο χρονικό διάστημα σε περιορισμένη ποσότητα υδρατμών, σχηματίζεται μία επιστρωμένη σκόνη από διοξείδιο του πλουτωνίου πάνω στην επιφάνειά του.^[30] Σχηματίζεται επίσης και υδρίδιο του πλουτωνίου, αλλά υπό μεγάλες ποσότητες υδρατμών σχηματίζεται μόνο διοξείδιο του πλουτωνίου.^[51]

Αυτή η επιστρωση κάνει το μέταλλο πυροφορικό, που σημαίνει ότι μπορεί να αναφλεγεί αυθόρμητα, έτσι ο χειρισμός μεταλλικού πλουτωνίου γίνεται σε ξηρή και αδρανή ατμόσφαιρα, από άζωτο ή αργό. Το οξυγόνο επιβραδύνει τις επιπτώσεις της υγρασίας.^[30]

Το πλουτώνιο δείχνει τεράστια, και αναστρέψιμα ποσοστά αντίδρασης με το καθαρό υδρογόνο, σχηματίζοντας υδρίδιο του πλουτωνίου.^[35] Αντιδρά επίσης εύκολα με το οξυγόνο, δημιουργώντας PuO (οξείδιο του πλουτωνίου) και PuO_2 (διοξείδιο του πλουτωνίου) και άλλα ενδιάμεσα οξείδια: το οξείδιο του πλουτωνίου είναι 40% μεγαλύτερο σε όγκο από το μεταλλικό πλουτώνιο. Αντιδρά με τα αλογόνα, δίνοντας ενώσεις της μορφής PuX_3 (όπου είναι το X είναι τα αλογόνα εκτός από το άστατο). Θεωρείται πως μπορεί να υπάρχει και η ένωση PuF_4 . Παρατηρούνται τα ακόλουθα οξυαλογονίδια: PuOCl , PuOBr και PuOI . Αντιδρά με τον άνθρακα σχηματίζοντας την ένωση PuC (καρβίδιο του πλουτωνίου), με το άζωτο σχηματίζοντας PuN (νιτρίδιο του πλουτωνίου), και με το πυρίτιο σχηματίζοντας PuSi .^{[7][24]}

Τα χωνευτήρια για την τήξη πλουτωνίου πρέπει να αντέχουν τις ισχυρές αναγωγικές του ιδιότητες. Πυρίμαχα μέταλλα όπως ταντάλιο και βολφράμιο μαζί με τα πιο σταθερά οξείδια, βορίδια, καρβίδια, νιτρίδια και πυριτίδια είναι κατάλληλα. Η τήξη σε ηλεκτρική κάμινo τόξου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μικρών ράβδων του μετάλλου χωρίς την ανάγκη της χοάνης.^[38]

Το δημήτριο χρησιμοποιείται ως χημικός προσομοιωτής του πλουτωνίου για την ανάπτυξη μεθόδων αποθήκευσης, εξόρυξης και άλλων τεχνολογιών.^[53]

Ηλεκτρονική διαμόρφωση: τα πέντε ηλεκτρόνια της στοιβάδας F

Η ανώμαλη συμπεριφορά του πλουτωνίου προκαλείται από την ηλεκτρονική δομή του. Η διαφορά της ενέργειας μεταξύ των τροχιακών $6d$ και $5f$ είναι πολύ μικρή. Η εγγύτητα των επιπέδων ενέργειας οδηγεί σε πολλές διαμορφώσεις ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας με σχεδόν ίσα επίπεδα ενέργειας. Αυτό οδηγεί σε ανταγωνισμό των διαμορφώσεων $5f^m 7s^2$ και $5f^{m-1} 6d^1 7s^2$, στις οποίες οφείλεται η ιδιαιτερότητα της χημικής συμπεριφοράς του πλουτωνίου. Ο προσανατολισμός των $5f$ τροχιακών είναι υπεύθυνος για τους χημικούς δεσμούς στα μόρια και στα σύμπλοκα που περιέχουν πλουτώνιο.^[35]

Κράματα

Το πλουτώνιο μπορεί να σχηματίσει κράματα και γενικότερα στερεά διαλύματα με πολλά μέταλλα. Εξαιρέσεις περιλαμβάνουν το λίθιο, το νάτριο, το κάλιο και το ρουβίδιο από τα αλκαλιμέταλλα, το μαγνήσιο, το ασβέστιο, το στρόντιο και το βάριο από τις αλκαλικές γαίες, και το ευρώπιο και το υπτέρβιο από τις σπάνιες γαίες.^[51] Επιμέρους εξαιρέσεις περιλαμβάνουν τα πυρίμαχα μέταλλα χρώμιο, μολυβδαίνιο, νιόβιο, ταντάλιο και βολφράμιο, τα οποία είναι διαλυτά σε υγρό πλουτώνιο, αλλά αδιάλυτα ή ελάχιστα διαλυτά σε στερεό πλουτώνιο.^[51] Το γάλλιο, το αλουμίνιο, το αμερίκιο, το σκάνδιο και το δημήτριο μπορούν να σταθεροποιήσουν τη δ αλλοτροπική μορφή του πλουτωνίου σε θερμοκρασία δωματίου (20°C). Το πυρίτιο, το ίνδιο, ο ψευδάργυρος και το ζιρκόνιο επιτρέπουν την εμφάνιση της δ αλλοτροπικής μορφής υπό ταχεία ψύξη. Υψηλά ποσά του αφνίου, ολμίου και θαλλίου μπορούν επίσης να διατηρήσουν ένα μέρος της δ φάσης σε θερμοκρασία δωματίου. Το ποσειδώνιο είναι το μόνο χημικό στοιχείο που μπορεί να σταθεροποιήσει την α αλλοτροπική μορφή σε υψηλές θερμοκρασίες.^[35]

Τα κράματα του πλουτωνίου μπορούν να παραχθούν με την προσθήκη ενός μετάλλου σε τηγμένο πλουτώνιο. Ωστόσο, αν το μέταλλο του κράματος είναι επαρκώς αναγωγικό, το πλουτώνιο προστίθεται και με μορφή οξειδίων ή αλογονιδίων. Τα κράματα της δ φάσης του πλουτωνίου μαζί με γάλλιο και τα κράματα πλουτωνίου-αλουμινίου παράγονται με την προσθήκη τριφθοριούχου πλουτωνίου μέσα σε λειωμένο γάλλιο ή αλουμίνιο. Έτσι, αποφεύγεται η άμεση χρήση του επικίνδυνου πλουτωνίου.^[54]

- Το **κράμα πλουτωνίου-γαλλίου** χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση της δ αλλοτροπικής μορφής του πλουτωνίου, αποφεύγοντας τη α-φάση και τα α-δ συναφή προβλήματα. Χρησιμοποιείται κυρίως στον πυρήνα πυρηνικών όπλων κατάρρευσης.^[55]
- Το **κράμα πλουτωνίου-αλουμινίου** είναι εναλλακτικό του κράματος πλουτωνίου-γαλλίου. Ήταν το αρχικό κράμα που μελετήθηκε διότι σταθεροποιεί τη δ-φάση του πλουτωνίου, ωστόσο, η τάση του να αντιδρά με σωματίδια α και να απελευθερώνει νετρόνια μειώνει τη χρησιμότητά του στα πυρηνικά όπλα. Το κράμα αυτό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως συστατικό του πυρηνικού καυσίμου.^[56]
- Το **κράμα πλουτωνίου-γαλλίου-κοβαλτίου** (PuCoGa_5) είναι ένας αντισυμβατικός υπεραγωγός, που εμφανίζει υπεραγωγιμότητα κάτω από τους $18,5\text{K}$, μία τάξη μεγέθους υψηλότερα από τη μεγαλύτερη μεταξύ των συστημάτων των βαρέων φερμιονίων, και έχει μεγάλο κρίσιμο ρεύμα.^{[57][58]}

- Το **κράμα πλουτωνίου-ζιρκονίου** μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο.^[59]
- Τα **κράματα πλουτωνίου-δημητρίου** και **πλουτωνίου-δημητρίου-κοβαλτίου** χρησιμοποιούνται ως πυρηνικά καύσιμα.^[60]
- Το **κράμα πλουτωνίου-ουρανίου**, με περίπου 15-30% mol πλουτωνίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο για τους ταχείς αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Ωστόσο η πυροφορική του φύση και η υψηλή ευαισθησία στη διάβρωση στο σημείο αυτανάφλεξης και ο θρυμματισμός του όταν εκτίθεται στον αέρα απαιτεί κράμα με άλλα στοιχεία. Ακόμα και με προσθήκη αλουμινίου, άνθρακα ή χαλκού, δεν βελτιώνονται αισθητά τα ποσοστά της αποσύνθεσης. Το ζιρκόνιο και τα κράματα σιδήρου έχουν μεγαλύτερη διαβρωτική αντίσταση, αλλά αποσυντίθεται όταν βρίσκεται στον αέρα αρκετούς μήνες. Όταν προστεθεί τιτάνιο και/ή ζιρκόνιο αυξάνεται σημαντικά το σημείο τήξης του κράματος.^[61]
- Το **κράμα πλουτωνίου-ουρανίου-τιτανίου** και **πλουτωνίου-ουρανίου-ζιρκονίου** διερευνήθηκε αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πυρηνικά καύσιμα. Η προσθήκη του τρίτου στοιχείου στα κράματα αυξάνει τη διαβρωτική αντίσταση, μειώνει την ευφλεκτότητα και βελτιώνει την ολκιμότητα, την ελατότητα, τη δύναμη και θερμική διαστολή. Το **κράμα πλουτωνίου-ουρανίου-μολυβδαινίου** έχει την καλύτερη διαβρωτική αντίσταση, σχηματίζει ένα προστατευτικό φιλμ οξειδίων, αλλά το τιτάνιο και το ζιρκόνιο προτιμούνται για λόγους φυσικής.^[61]
- Το **κράμα θορίου-ουρανίου-πλουτωνίου** διερευνάται αν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πυρηνικό καύσιμο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων.^[61]

Φυσική αφθονία

Ιχνοποσότητες τουλάχιστον τριών ισοτόπων του πλουτωνίου (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{244}Pu) υπάρχουν στη φύση. Τχη ^{239}Pu , μερικά ppt (μέρη ανά τρισεκατομμύριο), και τα προϊόντα διάσπασής του βρίσκονται σε κάποια ορυκτά του ουρανίου^[12], όπως στον φυσικό πυρηνικό αντιδραστήρα στην περιοχή Oklo της Γκαμπόν.^[62] Οι ιχνοποσότητες αυτές του ^{239}Pu προέρχονται από την εξής διαδικασία: Σε σπάνιες περιπτώσεις το ^{238}U σχάζεται αυθόρμητα, και εκπέμπονται ένα με δύο νετρόνια. Όταν ένας άλλος πυρήνας ^{238}U συλλάβει ένα νετρόνιο μετατρέπεται στο βραχύβιο ^{239}U , το οποίο διασπάται σε ποσειδώνιο-239 (^{239}Np), και στη συνέχεια το ^{239}Np διασπάται σε ^{239}Pu .

Εφόσον το σχετικά μακρόβιο ^{240}Pu υπάρχει στη ραδιενεργό σειρά διάσπασης του πλουτωνίου-244 θα έπρεπε να υπάρχει και αυτό, αν και 10,000 φορές σπανιότερο. Τέλος, εξαιρετικά μικρές ποσότητες ^{238}Pu , που οφείλονται στη σπανιότατη διπλή βήτα διάσπαση του ^{238}U , έχουν ανιχνευτεί σε φυσικά δείγματα ουρανίου.^[63]

Ιχνοποσότητες πλουτωνίου συνήθως ανιχνεύονται στο ανθρώπινο σώμα λόγω των 550 ατμοσφαιρικών και υποβρύχιων πυρηνικών δοκιμών, καθώς και των κύριων πυρηνικών ατυχημάτων. Οι περισσότερες ατμοσφαιρικές και υποβρύχιες πυρηνικές δοκιμές έχουν σταματήσει από τη Limited Test Ban Treaty το 1963, η οποία υπογράφηκε από τις USA, Ηνωμένο Βασίλειο, Σοβιετική Ένωση και άλλες χώρες. Ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές συνεχίστηκαν και μετά το 1963 από χώρες που δεν υπέγραψαν τη συνθήκη συμπεριλαμβανομένου της Κίνας (πυρηνική δοκιμή ατομικής βόμβας στην έρημο Γκόμπι το 1964, βόμβας υδρογόνου το 1967, και μετέπειτα δοκιμές), και της Γαλλίας (δοκιμές μέχρι και τη δεκαετία του 90). Λόγω του ότι εσκεμμένα παρασκευάζεται για πυρηνικά όπλα και πυρηνικούς αντιδραστήρες, το ^{239}Pu είναι το πιο άφθονο ισότοπο του πλουτωνίου.^[7]

Εφαρμογές

Πυρηνικά όπλα

Το ισότοπο Pu-239 είναι βασικό σχάσιμο υλικό στα πυρηνικά όπλα λόγω της ευκολίας σχάσης του και της διαθεσιμότητάς του. Περιβάλλοντας (προαιρετικά) τη σφαίρα του πλουτωνίου με ένα στρώμα πυκνού υλικού μειώνεται η κρίσιμη μάζα του πλουτωνίου (λόγω της ανάκλασης μέρους των νετρονίων που θα διέφευγαν από τη σφαίρα) από τα 16 kg στα 10 kg, το οποίο αντιστοιχεί σε σφαίρα με διάμετρο περίπου 10 cm.^[64] Η κρίσιμη μάζα αυτή είναι περίπου το ένα τρίτο της αντίστοιχης του U-235.^[9]

Οι βόμβες πλουτωνίου τύπου Fat Man που κατασκευάστηκαν κατά τη διάρκεια του προγράμματος Μανχάταν έκαναν χρήση εκρηκτικής συμπίεσης του πλουτωνίου, ώστε να πετύχουν σημαντικά υψηλότερες πυκνότητες των κανονικών, συνδυσασμένης με κεντρική πηγή νετρονίων για την εκκίνηση της αντίδρασης και την αύξηση της απόδοσης. Επομένως, μόνο 6,2 kg πλουτωνίου χρειάστηκαν για πυρηνική έκρηξη ισοδύναμη με 20 κιλοτόνους TNT.^{[21][65]} Θεωρητικά, 4 kg ή και λιγότερα θα ήταν αρκετά για την κατασκευή μιας ατομικής βόμβας με τη χρήση πολύ εξελιγμένου σχεδιασμού συναρμολόγησης.^[65]



Η ατομική βόμβα που έπεσε στο Ναγκασάκι, στην Ιαπωνία το 1945 είχε πυρήνα πλουτωνίου

Μικτά καύσιμα οξειδίων

Τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα από τους κανονικούς αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος περιέχουν πλουτώνιο, αλλά είναι ένα μίγμα πλουτωνίου-242, 240, 239 και 238. Το μίγμα δεν είναι αρκετά εμπλουτισμένο για αποδοτικά πυρηνικά όπλα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια φορά σε καύσιμα MOX (Mixed Oxide Fuel). Τυχαίες συλλήψεις νετρονίων αυξάνουν τα ποσά των ^{242}Pu και ^{240}Pu κάθε φορά που το πλουτώνιο ακτινοβολείται σε έναν αντιδραστήρα με θερμικά νετρόνια, έτσι ώστε μετά από τον δεύτερο κύκλο, το πλουτώνιο μπορεί να

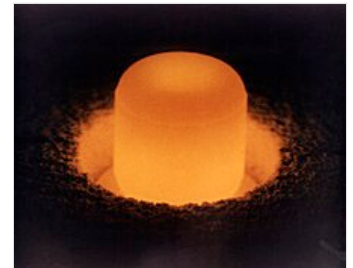
καταναλωθεί μόνο από αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Αν αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων δεν είναι διαθέσιμοι (η συνήθης περίπτωση), το πλουτώνιο που περισσεύει απορρίπτεται συνήθως, και αποτελεί το μακροβιότερο συστατικό των πυρηνικών αποβλήτων. Η επιθυμία να καταναλωθεί αυτό το πλουτώνιο, αλλά και άλλα υπερουράνια καύσιμα, και να μειωθεί η ραδιοτοξικότητα των αποβλήτων είναι ο συνηθισμένος λόγος που παραθέτουν οι πυρηνικοί μηχανικοί για την κατασκευή αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων.

Στην πιο κοινή χημική διαδικασία, PUREX, επανεπεξεργάζονται τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα για την εξαγωγή πλουτωνίου και ουρανίου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα αναμιγμένου οξειδίου (MOX) σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Πλουτώνιο βαθμού όπλων μπορεί να προστεθεί στο μείγμα καυσίμου. Το καύσιμο MOX χρησιμοποιείται σε αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος και αποτελείται από 60 kg πλουτωνίου ανά τόνο καυσίμου. Μετά από τέσσερα έτη, τρία τέταρτα του πλουτωνίου έχουν καεί (μετατραπεί σε άλλα στοιχεία).^[7]

Πηγή ενέργειας και θερμότητας

Το ισότοπο ^{238}Pu έχει ημιζωή 87.74 ετών.^[66] Εκπέμπει μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας με χαμηλά επίπεδα ακτίνων γάμμα/σωματιδίων και αυθόρμητων νετρονίων.^[67] Λόγω του ότι είναι εκπομπός ακτίνων άλφα, συνδυάζει την υψηλής ενέργειας ακτινοβολία με τη χαμηλή διείσδυση και γι' αυτό απαιτεί ελάχιστη θωράκιση. Ένα φύλλο χαρτί μπορεί να σταματήσει τα σωματίδια-α που εκπέμπονται από το ^{238}Pu . Ένα χιλιόγραμμα του ισότοπου παράγει περίπου 570 Watt θερμικής ενέργειας.^{[9][67]}

Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν κατάλληλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συσκευές που πρέπει να λειτουργήσουν χωρίς άμεση συντήρηση για χρονικά διαστήματα που προσεγγίζουν τη διάρκεια μιας ανθρώπινης ζωής. Επομένως χρησιμοποιείται σε θερμοηλεκτρικές γεννήτριες ραδιοϊσοτόπου και μονάδες θέρμανσης ραδιοϊσοτόπου όπως εκείνα στις διαστημικές αποστολές Cassini, Voyager και New Horizons.^[7]



Ένας λαμπερός κύλινδρος από $^{238}\text{PuO}_2$

Τα δύο διαστημικά σκάφη Voyager που εκτοξεύτηκαν το 1977, περιείχαν το καθένα πηγή θέρμανσης πλουτωνίου 500 Watt. Περισσότερο από 30 χρόνια αργότερα κάθε πηγή συνεχίζει να παράγει 300 Watt περίπου, επιτρέποντας την περιορισμένη λειτουργία του κάθε διαστημικού σκάφους.

Το ^{238}Pu έχει επίσης χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για να τροφοδοτήσει τεχνητούς βηματοδότες, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος επαναλαμβανόμενης χειρουργικής επέμβασης.^{[68][69]} Έχει αντικατασταθεί κατά ένα μεγάλο μέρος από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου, αλλά από το 2003 εμφυτεύθηκαν περίπου 50 με 100 βηματοδότες τροφοδοτούμενοι με πλουτώνιο, οι οποίοι λειτουργούν ακόμα στους ζωντανούς ασθενείς.^[70] Το ^{238}Pu μελετήθηκε ως συμπληρωματική πηγή θερμότητας στην κατάδυση με σκάφανδρο.^[71] ^{238}Pu αναμιγμένο με βηρύλλιο χρησιμοποιείται για να παράγει νετρόνια για ερευνητικούς λόγους.^[7]

Προφυλάξεις

Τοξικότητα

Τα ισότοπα και οι ενώσεις του πλουτωνίου είναι ραδιενεργά και συσσωρεύονται στον μυελό των οστών. Μόλυνση από το οξύδιο του πλουτωνίου έχει προκύψει από διάφορες πυρηνικές καταστροφές και ραδιενεργά ατυχήματα συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών πυρηνικών ατυχημάτων όπου τα πυρηνικά όπλα είχαν καεί.^[72]

Μελέτες των αποτελεσμάτων από τις ανωτέρω περιορισμένες μολύνσεις, καθώς και των εκτεταμένων θανάτων και δηλητηριάσεων από ακτινοβολία που ακολούθησαν τη ρίψη των πυρηνικών βομβών στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι, έχουν παράσχει σημαντικές πληροφορίες για τους κινδύνους, τα συμπτώματα και την πρόγνωση της δηλητηρίασης από ακτινοβολία (αν και στην περίπτωση των Ιαπώνων επιζώντων σχετίζονται ελάχιστα με την άμεση έκθεση σε πλουτώνιο).^[73]

Κατά τη διάσπαση του πλουτωνίου, τρεις τύποι ακτινοβολίας εκπέμπονται: α,β και γ. Η ακτινοβολία-α διανύει μικρή απόσταση και δεν διαπερνάει το εξωτερικό μέρος του ανθρώπινου δέρματος, που αποτελείται από νεκρά κύτταρα. Η ακτινοβολία-β μπορεί να διαπεράσει το δέρμα, αλλά δεν μπορεί να διεισδύσει βαθιά στο ανθρώπινο σώμα. Η ακτινοβολία-γ μπορεί να διεισδύσει βαθιά.^[74] Και οι τρεις αυτές ακτινοβολίες είναι ιονίζουσες. Είτε οξεία είτε μακροπρόθεσμη έκθεση σε αυτές προκαλεί σοβαρό κίνδυνο για την υγεία συμπεριλαμβανομένου δηλητηρίασης από ακτινοβολία, γενετικών βλαβών, καρκίνου, και θάνατο. Ο κίνδυνος αυξάνει με την αύξηση της έκθεσης.

Αν και η ακτινοβολία-α δεν μπορεί να διαπεράσει το δέρμα, όταν πλουτώνιο εισπνέεται ή καταπίνεται, ακτινοβολούνται τα εσωτερικά όργανα.^[7] Ο σκελετός, όπου το πλουτώνιο απορροφάται, και το συνώτι, όπου μαζεύεται και συγκεντρώνεται, κινδυνεύουν.^[51] Το πλουτώνιο δεν απορροφάται αποτελεσματικά όταν καταπίνεται, μόνο το 0,04% του οξειδίου του πλουτωνίου απορροφάται κατά την κατάποση.^[7] Πλουτώνιο που έχει απορροφηθεί από το σώμα, αποβάλλεται πολύ αργά, με βιολογική ημιζωή 200 ετών.^[75]

Το πλουτώνιο διαπερνά ελάχιστα τις κυτταρικές μεμβράνες και τα γαστρεντερικά τοιχώματα, επομένως η απορρόφηση μέσω κατάποσης και η ενσωμάτωσή του στα οστά προχωράει πολύ αργά.^{[76][77]}

Το πλουτώνιο είναι πιο επικίνδυνο όταν εισπνέεται, παρά όταν καταπίνεται. Ο κίνδυνος για καρκίνο των πνευμόνων αυξάνει μόλις η ισοδύναμη δόση του εισπνεόμενου πλουτωνίου υπερβεί τα 400 mSv.^[78] Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ εκτιμά πως η πιθανότητα καρκίνου των πνευμόνων από την εισπνοή 5.000 σωματιδίων πλουτωνίου, διαμέτρου 3μm το καθένα, είναι κατά 1% πάνω από τον μέσο όρο του υποβάθρου.^[79] Η κατάποση ή η εισπνοή μεγάλων ποσοτήτων μπορεί να προκαλέσει δηλητηρίαση από ακτινοβολία και θάνατο. Δεν έχει ωστόσο καταγραφεί περιστατικό θανάτου από κατάποση ή εισπνοή πλουτωνίου, και πολλοί άνθρωποι έχουν μετρήσιμες ποσότητες πλουτωνίου στο αίμα τους.^[80]

Αρκετές πληθυσμιακές ομάδες που εκτέθηκαν σε σκόνη πλουτωνίου (π.χ. άνθρωποι που εκτέθηκαν σε ανέμους της ερήμου Νεβάδας μετά τις πυρηνικές δοκιμές, οι επιζώντες του Ναγκασάκι, εργάτες σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, και ασθενείς στους οποίους έγιναν πειράματα με ενέσεις Pu το 1945-1946) έχουν μελετηθεί προσεκτικά. Αυτές οι μελέτες γενικά δεν δείχνουν εξαιρετικά μεγάλη τοξικότητα του πλουτωνίου ή αυξημένους καρκίνους, π.χ. ο Albert Stevens έφτασε σε μεγάλη ηλικία παρά την ένεση Pu.^[76]

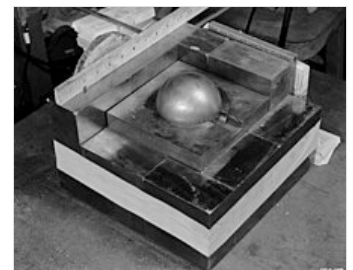
Υπήρξαν περίπου 25 εργάτες στο εργαστήριο του Los Alamos που εισέπνευσαν σημαντικές ποσότητες σκόνης πλουτωνίου κατά το 1940. Σύμφωνα με τη θεωρία του "καυτού σωματιδίου", καθένας από αυτούς είχε 99,5% πιθανότητα να είναι νεκρός μέχρι τώρα από καρκίνο των πνευμόνων, αλλά δεν υπήρξε ούτε μία περίπτωση καρκίνου των πνευμόνων σε αυτούς.^{[81][82]}

Το πλουτώνιο έχει μεταλλική γεύση.^[83]

Πιθανότητα κρίσιμότητας

Εκτός της τοξικότητας, πρέπει να ληφθούν μέτρα για να την αποφυγή συσσώρευσης ποσότητας πλουτωνίου που πλησιάζει την κρίσιμη μάζα, μια και η απαιτούμενη ποσότητα είναι μόνο ένα τρίτο από αυτή του ουρανίου-235.^[9] Μια κρίσιμη μάζα πλουτωνίου εκπέμπει θανατηφόρα ποσά νετρονίων και ακτίνων γάμμα.^[84] Το πλουτώνιο σε διάλυμα είναι πιο πιθανό να σχηματίσει κρίσιμη μάζα από ό,τι σε στερεά μορφή, λόγω του ότι το υδρογόνο του νερού δρα ως επιβραδυντής νετρονίων.^[24]

Ατυχήματα κρίσιμης μάζας έχουν συμβεί στο παρελθόν, μερικά απ' αυτά με θανατηφόρες συνέπειες. Ο απρόσεκτος χειρισμός των τούβλων καρβιδίου του βολφραμίου γύρω από μια σφαίρα πλουτωνίου 6,2 kg οδήγησε σε μια μοιραία δόση ακτινοβολίας στο Λος Άλαμος στις 21 Αυγούστου 1945, όταν ο επιστήμονας Χάρι Κ. Ντάλιαν (Harry K. Daghlian) ο νεώτερος, έλαβε δόση που υπολογίστηκε να είναι 5,1 Sievert (510 rems) και πέθανε 28 ημέρες αργότερα.^[85] Εννέα μήνες αργότερα, ένας άλλος επιστήμονας του Λος Άλαμος, ο Λούις Σλότιν (Louis Slotin), πέθανε από ένα παρόμοιο ατύχημα που περιλάμβανε έναν ανακλαστήρα βηρυλλίου και τον ίδιο πυρήνα πλουτωνίου (τον αποκαλούμενο "πυρήνα του δαίμονα") που στοίχισε τη ζωή στον Ντάλιαν.^[86] Αυτά τα γεγονότα παρουσιάστηκαν στην ταινία του "Fat Man" και του "Little Boy" το 1989.



Προσομοίωση της σφαίρας του πλουτωνίου που περιβάλλεται από τούβλα καρβιδίου του βολφραμίου (ανακλαστές νετρονίων) σε αναπαράσταση του πειράματος του Χάρι Ντάλιαν το 1945.

Τον Δεκέμβριο του 1958, κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας με το πλουτώνιο στο Λος Άλαμος, σχηματίστηκε κρίσιμη μάζα σε ένα δοχείο ανάμιξης, η οποία οδήγησε στον θάνατο ενός χημικού χειριστή με το όνομα Cecil Kelley.^[87] Άλλα πυρηνικά ατυχήματα έχουν συμβεί στη Σοβιετική Ένωση, την Ιαπωνία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και πολλές άλλες χώρες.^[87]

Ευφλεκτότητα

Το μεταλλικό πλουτώνιο αποτελεί παράγοντα κινδύνου πυρκαγιάς, ειδικά εάν το υλικό βρίσκεται σε λεπτό διαμερισμό. Σε υγρό περιβάλλον το πλουτώνιο σχηματίζει υδρίδια στην επιφάνειά του, τα οποία είναι αυτοαναφλέξιμα και μπορούν να αναφλεγούν στον αέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Το πλουτώνιο αυξάνει μέχρι 70% τον όγκο του καθώς οξειδώνεται και μπορεί έτσι να σπάσει το δοχείο του.^[88] Η ραδιενέργεια του καίόμενου υλικού είναι ένας πρόσθετος κίνδυνος. Άμμος οξειδίων μαγνησίου είναι πιθανώς το αποτελεσματικότερο υλικό για την εξάλειψη μιας πυρκαγιάς πλουτωνίου. Ψύχει το καίόμενο υλικό και μπλοκάρει το οξυγόνο. Ειδικές προφυλάξεις είναι απαραίτητες για να αποθηκευτεί ή να χειριστεί πλουτώνιο οποιασδήποτε μορφής. Γενικά, απαιτείται ξηρή ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου.^{[88][89][Σημ. 10]}

Δείτε Επίσης

- Πυρηνική φυσική

Παραπομπές

1. *BNL-NCS 51363, vol. II* (https://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?query_id=0&page=0&osti_id=5972980) Αρχειοθετήθηκε (https://web.archive.org/web/20110629180141/http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?query_id=0&page=0&osti_id=5972980) 2011-06-29 στο Wayback Machine. (1981), σελ. 835ff

2. Michael E. Wieser and Tyler B. Coplen (Δεκέμβριος 2010). «Ατομικά βάρη των στοιχείων 2009 (IUPAC Technical Report)» (<http://www.iupac.org/publications/pac/pdf/2011/pdf/8302x0359.pdf>) (PDF). *Pure Appl. Chem.* **83** (2): 371. <http://www.iupac.org/publications/pac/pdf/2011/pdf/8302x0359.pdf>. Ανακτήθηκε στις 11/8/2011.
3. Holden, Norman E. (2001). «Ένα Σύντομο Ιστορικό του τομέα των πυρηνικών δεδομένων και της αξιολόγησής τους» (<http://www.nndc.bnl.gov/content/evaluation.html>). *51st Meeting of the USDOE Cross Section Evaluation Working Group*. Upton (NY): National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. Ανακτήθηκε στις 3 Ιανουαρίου 2009.
4. Fermi, Enrico (12 Δεκεμβρίου 1938). «Artificial radioactivity produced by neutron bombardment: Nobel Lecture» (<http://www.nobel.se/physics/laureates/1938/fermi-lecture.pdf>) (PDF). Royal Swedish Academy of Sciences.
5. Darden, Lindley (1998). «Enrico Fermi: "Transuranium" Elements, Slow Neutrons». *The Nature of Scientific Inquiry* (<https://web.archive.org/web/20120817040843/http://www.philosophy.umd.edu/Faculty/LDarden/sciinq/>). College Park (MD): Department of Philosophy, University of Maryland. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.philosophy.umd.edu/Faculty/LDarden/sciinq/>) στις 17 Αυγούστου 2012. Ανακτήθηκε στις 3 Ιανουαρίου 2008.
6. LBNL contributors. «Elements 93 and 94» (<https://web.archive.org/web/20080920143117/http://acs.lbl.gov/Seaborg.talks/65th-anniv/14.html>). Advanced Computing for Science Department, Lawrence Berkeley National Laboratory. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://acs.lbl.gov/Seaborg.talks/65th-anniv/14.html>) στις 20 Σεπτεμβρίου 2008. Ανακτήθηκε στις 17 Σεπτεμβρίου 2008.
7. Emsley 2001
8. Stwertka 1998
9. Heiserman 1992
10. Clark, David L.; Hobart, David E. (2000). «Reflections on the Legacy of a Legend: Glenn T. Seaborg, 1912–1999» (<http://www.fas.org/spp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* **26**: 56–61, on 57. <http://www.fas.org/spp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2009-02-15.
11. PBS contributors (1997). «Frontline interview with Seaborg» (<http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/interviews/seaborg.html>). *Frontline*. Public Broadcasting Service. Ανακτήθηκε στις 7 Δεκεμβρίου 2008.
12. Miner 1968, σελ. 541
13. NPS contributors. «Room 405, George Herbert Jones Laboratory» (<https://web.archive.org/web/20080208100011/http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=735&ResourceType=Building>). National Park Service. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://tps.cr.nps.gov/nhl/detail.cfm?ResourceId=735&ResourceType=Building>) στις 8 Φεβρουαρίου 2008. Ανακτήθηκε στις 14 Δεκεμβρίου 2008.
14. Miner 1968, σελ. 540
15. LANL contributors. «Site Selection» (<http://www.lanl.gov/history/road/siteselection.shtml>). *LANL History*. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory. Ανακτήθηκε στις 23 Δεκεμβρίου 2008.
16. Sublette, Carey. «Atomic History Timeline 1942–1944» (https://web.archive.org/web/20090104020055/http://www.atomicheritage.org/index.php?option=com_content&task=view&id=288&Itemid=202). Washington (DC): Atomic Heritage Foundation. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (http://www.atomicheritage.org/index.php?option=com_content&task=view&id=288&Itemid=202) στις 4 Ιανουαρίου 2009. Ανακτήθηκε στις 22 Δεκεμβρίου 2008.
17. Rincon, Paul (2 Μαρτίου 2009). «BBC NEWS – Science & Environment – US nuclear relic found in bottle» (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7918618.stm>). *BBC News*. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7918618.stm>. Ανακτήθηκε στις 2 Μαρτίου 2009.
18. Gebel, Erika (2009). «Old plutonium, new tricks». *Analytical Chemistry* **81** (5): 1724. doi:10.1021/ac900093b (<https://dx.doi.org/10.1021%2Fac900093b>).
19. Schwantes, Jon M.; Matthew Douglas; Steven E. Bonde; James D. Briggs; Orville T. Farmer; Lawrence R. Greenwood; Elwood A. Lepel; Christopher R. Orton και άλλοι. (2009). «Nuclear archeology in a bottle: Evidence of pre-Trinity U.S. weapons activities from a waste burial site». *Analytical Chemistry* **81** (4): 1297–1306. doi:10.1021/ac802286a (<https://dx.doi.org/10.1021%2Fac802286a>). PMID 19152306 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19152306>).
20. Sublette, Carey (3 Ιουλίου 2007). «8.1.1 The Design of Gadget, Fat Man, and "Joe 1" (RDS-1)» (<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq8.html#nfaq8.1.1>). *Nuclear Weapons Frequently Asked Questions, edition 2.18*. The Nuclear Weapon Archive. Ανακτήθηκε στις 4 Ιανουαρίου 2008.
21. Malik, John (Σεπτέμβριος 1985). *The Yields of the Hiroshima and Nagasaki Explosions* (<http://www.fas.org/spp/othergov/doe/lanl/docs1/00313791.pdf>) (PDF). Los Alamos. σελ. Table VI. LA-8819. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2009.
22. DOE contributors (2001). *Historic American Engineering Record: B Reactor (105-B Building)* (<http://www.fas.org/spp/othergov/doe/pu50yb.html#ZZ13>). Richland (WA): U.S. Department of Energy. σελ. 110. DOE/RL-2001-16. Ανακτήθηκε στις 24 Δεκεμβρίου 2008.
23. Cochran, Thomas B. (1997). «Safeguarding nuclear weapons-usable materials in Russia» (https://web.archive.org/web/20130705053828/http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc_06129701a_185.pdf). International Forum on Illegal Nuclear Traffic. Washington (DC): Natural Resources Defense Council, Inc. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc_06129701a_185.pdf) στις 2013-07-05. https://web.archive.org/web/20130705053828/http://docs.nrdc.org/nuclear/files/nuc_06129701a_185.pdf. Ανακτήθηκε στις 21 Δεκεμβρίου 2008.
24. CRC 2006, σελίδες 4–27
25. Stockholm International Peace Research Institute (2007). *SIPRI Yearbook 2007: Armaments, Disarmament, and International Security* (<http://books.google.com/?id=2M0C6SERFG0C&pg=PA567>). Oxford University Press. σελ. 567. ISBN 0199230218. & (ISBN 9780199230211)

26. Press Secretary (23 Ιουλίου 2002). «President Signs Yucca Mountain Bill» (<https://georgewbush-whitehouse.archives.gov/news/releases/2002/07/20020723-2.html>). Washington (DC): Office of the Press Secretary, White House. Αρχειοθετήθηκε (<http://web.archive.org/web/20080306193653/http://georgewbush-whitehouse.archives.gov/news/releases/2002/07/20020723-2.html>) από το πρωτότυπο στις 6 Μαρτίου 2008. Ανακτήθηκε στις 4 Ιανουαρίου 2009.
27. Moss, William; Eckhardt, Roger (1995). «The Human Plutonium Injection Experiments» (<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326640.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* (Los Alamos National Laboratory) **23**: 188, 205, 208, 214. <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326640.pdf>. Ανακτήθηκε στις June 6, 2006.
28. Voelz, George L. (2000). «Plutonium and Health: How great is the risk?». *Los Alamos Science* (Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory) (26): 78–79.
29. Yesley, Michael S. (1995). «'Ethical Harm' and the Plutonium Injection Experiments» (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00326649.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* **23**: 280–283. <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00326649.pdf>. Ανακτήθηκε στις February 15, 2009.
30. NIH contributors. «Plutonium, Radioactive» (<https://www.webcitation.org/618bQEh1E?url=http://webwiser.nlm.nih.gov/getSubstanceData.do;jsessionid=89B673C34252C77B4C276F2B2D0E4260?substanceID=419>). *Wireless Information System for Emergency Responders (WISER)*. Bethesda (MD): U.S. National Library of Medicine, National Institutes of Health. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://webwiser.nlm.nih.gov/getSubstanceData.do;jsessionid=89B673C34252C77B4C276F2B2D0E4260?substanceID=419&displaySubstanceName=Plutonium,%20Radioactive&UNNAID=&STCCID=&selectedDataMenuItemId=44>) στις 22 Αυγούστου 2011. Ανακτήθηκε στις 23 Νοεμβρίου 2008. (public domain text)
31. ARQ staff (2008). «Nitric acid processing» (<https://web.archive.org/web/20100527200643/http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/3rdQuarter08/page3.shtml>). *Actinide Research Quarterly* (Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory) (3rd quarter). Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/3rdQuarter08/page3.shtml>) στις 2010-05-27. <https://web.archive.org/web/20100527200643/http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/3rdQuarter08/page3.shtml>. Ανακτήθηκε στις 2010-02-09. «While plutonium dioxide is normally olive green, samples can be various colors. It is generally believed that the color is a function of chemical purity, stoichiometry, particle size, and method of preparation, although the color resulting from a given preparation method is not always reproducible.».
32. NNDC contributors (2008). «Chart of Nuclides» (<https://www.webcitation.org/618bSpIPt?url=http://www.nndc.bnl.gov/chart/>). Alejandro A. Sonzogni (Database Manager). Upton (NY): National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>) στις 22 Αυγούστου 2011. Ανακτήθηκε στις 13 Σεπτεμβρίου 2008.
33. Rhodes, Richard (1986). *The Making of the Atomic Bomb* (https://archive.org/details/makingatomicbomb00rhod_050). New York: Simon & Schuster. σελίδες 659 (https://archive.org/details/makingatomicbomb00rhod_050/page/n695)–660. ISBN 0-671-65719-4. Leona Marshall: "When you hold a lump of it in your hand, it feels warm, like a live rabbit"
34. Miner 1968, σελ. 544
35. Hecker, Siegfried S. (2000). «Plutonium and its alloys: from atoms to microstructure» (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818035.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* **26**: 290–335. <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818035.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2009-02-15.
36. Hecker, Siegfried S.; Martz, Joseph C. (2000). «Aging of Plutonium and Its Alloys» (<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00818029.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* (Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory) (26): 242. <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00818029.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2009-02-15.
37. Baker, Richard D.; Hecker, Siegfried S.; Harbur, Delbert R. (1983). «Plutonium: A Wartime Nightmare but a Metallurgist's Dream» (<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?07-16.pdf>). *Los Alamos Science* (Los Alamos National Laboratory): 148, 150–151. <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?07-16.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2009-02-15.
38. Miner 1968, σελ. 542
39. «Plutonium Crystal Phase Transitions» (<http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/pu-phase.htm>). GlobalSecurity.org. <http://www.globalsecurity.org/wmd/intro/pu-phase.htm>.
40. EPA contributors (2008). «Fissile Material» (<http://www.epa.gov/rpdweb00/glossary/termdef.html#f>). *Radiation Glossary*. United States Environmental Protection Agency. Ανακτήθηκε στις 23 Νοεμβρίου 2008.
41. Asimov, Isaac (1988). «Nuclear Reactors». *Understanding Physics*. Barnes & Noble Publishing. σελ. 905. ISBN 0880292512.
42. Samuel Glasstone and Leslie M. Redman, *An Introduction to Nuclear Weapons* (<http://www.doeal.gov/opa/docs/RR00171.pdf>) Αρχειοθετήθηκε (<https://web.archive.org/web/20090827082245/http://www.doeal.gov/opa/docs/RR00171.pdf>) 2009-08-27 στο *Wayback Machine*. (Atomic Energy Commission Division of Military Applications Report WASH-1038, Ιούνιος 1972), p. 12.
43. Gosling, F.G. (1999). *The Manhattan Project: Making the Atomic Bomb* (<https://web.archive.org/web/20090224204033/http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/publications/DE99001330.pdf>) (PDF). Oak Ridge (TN): United States Department of Energy. σελ. 40. DOE/MA-0001-01/99. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.cfo.doe.gov/me70/manhattan/publications/DE99001330.pdf>) (PDF) στις 24 Φεβρουαρίου 2009. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2009.
44. DOE contributors (1996). *Plutonium: The First 50 Years* (<https://web.archive.org/web/20130218162928/http://www.doeal.gov/SWEIS/DOEDocuments/004%20DOE-DP-0137%20Plutonium%2050%20Years.pdf>) (PDF). U.S. Department of Energy. DOE/DP-1037. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.doeal.gov/SWEIS/DOEDocuments/004%20DOE-DP-0137%20Plutonium%2050%20Years.pdf>) (PDF) στις 18 Φεβρουαρίου 2013. Ανακτήθηκε στις 2 Αυγούστου 2010. (public domain text)
45. Kennedy, J. W.; Seaborg, G. T.; Segrè, E.; Wahl, A. C. (1946). «Properties of Element 94». *Physical Review* **70** (7–8): 555–556. doi:10.1103/PhysRev.70.555 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRev.70.555>).
46. Greenwood 1997, σελ. 1259

47. Seaborg, Glenn T.; McMillan, E.; Kennedy, J. W.; Wahl, A. C. (1946). «Radioactive Element 94 from Deuterons on Uranium». *Physical Review* **69** (7–8): 366–367. doi:10.1103/PhysRev.69.367 (<https://dx.doi.org/10.1103%2FPhysRev.69.367>).
48. «Can Reactor Grade Plutonium Produce Nuclear Fission Weapons?» (<https://web.archive.org/web/20210224141047/http://www.cnfc.or.jp/e/proposal/reports/index.html>). Council for Nuclear Fuel Cycle Institute for Energy Economics, Japan. Μάιος 2001. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.cnfc.or.jp/e/proposal/reports/index.html>) στις 24 Φεβρουαρίου 2021. Ανακτήθηκε στις 2 Αυγούστου 2010.
49. Matlack, George (2002). *A Plutonium Primer: An Introduction to Plutonium Chemistry and its Radioactivity*. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-02-6594.
50. Eagleson, Mary (1994). *Concise Encyclopedia Chemistry* (<https://archive.org/details/conciseencyclope00eagl>). Walter de Gruyter. σελ. 840. ISBN 9783110114515.
51. Miner 1968, σελ. 545
52. Pure plutonium hydroxide in capillary tube (<http://imglib.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/RESEARCH-1930-1990/NUCLEAR-PHYSICS/TRANSURANIUM-ELEMENTS/index/96602765.html>) Αρχειοθετήθηκε (<https://web.archive.org/web/20120322175208/http://imglib.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/RESEARCH-1930-1990/NUCLEAR-PHYSICS/TRANSURANIUM-ELEMENTS/index/96602765.html>) 2012-03-22 στο Wayback Machine., LBNL Image Library
53. Crooks, W. J. *et al.* (2002). «Low Temperature Reaction of Reillex™ HPQ and Nitric Acid» (<http://sti.srs.gov/fulltext/ms2000068/ms2000068.html>). *Solvent Extraction and Ion Exchange* **20**: 543. doi:10.1081/SEI-120014371 (<https://dx.doi.org/10.1081%2FSEI-120014371>). <http://sti.srs.gov/fulltext/ms2000068/ms2000068.html>.
54. Moody, Kenton James· Hutcheon, Ian D· Grant, Patrick M. (2005). "plutonium+alloys"&cd=22#v=onepage&q=%22plutonium%20alloys%22 *Nuclear forensic analysis* (<http://books.google.com/?id=W3FnEOg8tS4C&pg=PA169&dq=>). CRC Press. σελ. 169. ISBN 0849315131.
55. Kolman, D. G.; Colletti, L. P. (2009). «The aqueous corrosion behavior of plutonium metal and plutonium-gallium alloys exposed to aqueous nitrate and chloride solutions» (<http://books.google.com/?id=0o4DnYptWdgC&pg=PA71>). *ECS transactions*. **16**. Electrochemical Society, σελ. 71. ISSN 1938-5862 (<http://worldcat.org/issn/1938-5862>). <http://books.google.com/?id=0o4DnYptWdgC&pg=PA71>.
56. Hurst, D. G· Ward, A. G. *Canadian Research Reactors* (http://www.csirc.net/docs/reports/ref_066.pdf) (PDF). Los Alamos National Laboratory.
57. Dumé, Belle (November 20, 2002). «Το πλουτώνιο είναι επίσης ένας υπεραγωγός» (<https://web.archive.org/web/20120112184014/http://physicsworld.com/cws/article/news/16443>). PhysicsWeb.org. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://physicsworld.com/cws/article/news/16443>) στις 2012-01-12. <https://web.archive.org/web/20120112184014/http://physicsworld.com/cws/article/news/16443>. Ανακτήθηκε στις 2010-08-02.
58. Curro, N. J. (Spring 2006). *Αντισυμβατική υπεραγωγιμότητα σε PuCoGa₅* (<https://web.archive.org/web/20110722062226/http://www.lanl.gov/orgs/mpa/files/mrhighlights/LALP-06-072.pdf>). Εθνικό Εργαστήριο του Λος Άλαμος. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.lanl.gov/orgs/mpa/files/mrhighlights/LALP-06-072.pdf>) στις 2011-07-22. <https://web.archive.org/web/20110722062226/http://www.lanl.gov/orgs/mpa/files/mrhighlights/LALP-06-072.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2010-08-12.
59. McCuaig, Franklin D. "Pu-Zr alloy for high-temperature foil-type fuel" U.S. Patent 4.059.439 (<http://www.google.com/patents?vid=4059439>) , Εκδόθηκε 22 Νοεμβρίου 1977
60. Jha, D.K. (2004). *Nuclear Energy* (<http://books.google.com/?id=L79odes2ihEC&pg=PA73>). Discovery Publishing House. σελ. 73. ISBN 8171418848.
61. *plutonium 1965* (<http://books.google.com/?id=8r8NAAAAQAAJ&pg=PA456>). Taylor & Francis. 1965. σελ. 456.
62. DOE contributors (2004). «Oklo: Natural Nuclear Reactors» (<https://web.archive.org/web/20081020201724/http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0010.shtml>). U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0010.shtml>) στις 20 Οκτωβρίου 2008. Ανακτήθηκε στις 16 Νοεμβρίου 2008.
63. Peterson, Ivars (December 7, 1991). «Uranium displays rare type of radioactivity» (https://web.archive.org/web/20120118160007/http://findarticles.com/p/articles/mi_m1200/is_n23_v140/ai_11701241/). Science News. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (http://findarticles.com/p/articles/mi_m1200/is_n23_v140/ai_11701241/) στις 2012-01-18. https://web.archive.org/web/20120118160007/http://findarticles.com/p/articles/mi_m1200/is_n23_v140/ai_11701241/. Ανακτήθηκε στις 2013-05-15.
64. Martin, James E. (2000). *Physics for Radiation Protection* (1st έκδοση). Wiley-Interscience. σελ. 532. ISBN 0-471-35373-6.
65. FAS contributors (1998). «Nuclear Weapon Design» (<https://web.archive.org/web/20160828024344/http://fas.org/nuke/intro/nuke/design.htm>). Federation of American Scientists. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.fas.org/nuke/intro/nuke/design.htm>) στις 28 Αυγούστου 2016. Ανακτήθηκε στις 7 Δεκεμβρίου 2008.
66. «Science for the Critical Masses: How Plutonium Changes with Time» (<http://www.ieer.org/ensec/no-3/puchange.html>). Institute for Energy and Environmental Research.
67. ARQ contributors (2005). «From heat sources to heart sources: Los Alamos made material for plutonium-powered pumper» (<https://web.archive.org/web/20130216225324/http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/05spring/heart.html>). *Actinide Research Quarterly* (Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory) (1). Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/05spring/heart.html>) στις 2013-02-16. <https://web.archive.org/web/20130216225324/http://arq.lanl.gov/source/orgs/nmt/nmtdo/AQarchive/05spring/heart.html>. Ανακτήθηκε στις χρονιά του 2009 στις 15 φεβρουαρίου.
68. Venkateswara Sarma Mallela; V. Ilankumaran; and N.Srinivasa Rao (2004). «Trends in Cardiac Pacemaker Batteries» (<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=1502062>). *Indian Pacing Electrophysiol* **4** (4): 201–212. PMID 16943934 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16943934>).
69. Defunct pacemakers with Pu power source (<http://www.ornl.gov/ptp/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm>)

70. ORAU contributors (1974). «Plutonium Powered Pacemaker» (<http://www.oraui.org/PTP/collection/Miscellaneous/pacemaker.htm>). Oak Ridge (TN): Oraui.org. Ανακτήθηκε στις 12 Σεπτεμβρίου 2008.
71. Bayles, John J.; Taylor, Douglas (1970). *SEALAB III – Diver's Isotopic Swimsuit-Heater System* (<https://www.webcitation.org/618eDULQb?url=http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord>). Port Hueneme (CA): Naval Civil Engineering Lab. AD0708680. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0708680>) στις 2011-08-22. <https://www.webcitation.org/618eDULQb?url=http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord>. Ανακτήθηκε στις 2011-08-19.
72. ATSDR contributors (2007). «Toxicological Profile for Plutonium, Draft for Public Comment» (<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=648&tid=119>). U.S. Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Ανακτήθηκε στις 22 Μαΐου 2008.
73. Little, M P (June 2009). «Cancer and non-cancer effects in Japanese atomic bomb survivors». *J Radiol Prot* **29** (2A): A43–59. doi:10.1088/0952-4746/29/2A/S04 (<https://dx.doi.org/10.1088/0952-4746/29/2A/S04>). PMID 19454804 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19454804>). Bibcode: 2009JRP....29...43L (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2009JRP....29...43L>).
74. Plutonium (<https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=119>), CAS ID #: 7440-07-5, Centers for Disease Control and Prevention (CDC) Agency for Toxic Substances and Disease Registry
75. DOE staff. «Radiological control technical training» (<https://web.archive.org/web/20070630190114/http://hss.energy.gov/NuclearSafety/techstds/standard/hdbk1122-04/part9of9.pdf>) (PDF). U.S. Department of Energy. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://hss.energy.gov/NuclearSafety/techstds/standard/hdbk1122-04/part9of9.pdf>) (PDF) στις 30 Ιουνίου 2007. Ανακτήθηκε στις 14 Δεκεμβρίου 2008.
76. Cohen, Bernard L. «The Myth of Plutonium Toxicity» (<https://web.archive.org/web/20110826115232/http://russp.org/BLC-3.html>). Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://russp.org/BLC-3.html>) στις 26 Αυγούστου 2011. Ανακτήθηκε στις 20 Αυγούστου 2011.
77. Cohen, Bernard L. (Μάιος 1977). «Hazards from Plutonium Toxicity». *The Radiation Safety Journal: Health Physics* **32** (5): 359–379.
78. Brown, Shannon C.; Margaret F. Schonbeck; David McClure (July 2004). «Lung cancer and internal lung doses among plutonium workers at the Rocky Flats Plant: a case-control study» (<http://aje.oxfordjournals.org/cgi/content/full/160/2/163>). *American Journal of Epidemiology* (Oxford Journals) **160** (2): 163–172. doi:10.1093/aje/kwh192 (<https://dx.doi.org/10.1093/aje/kwh192>). PMID 15234938 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15234938>). <http://aje.oxfordjournals.org/cgi/content/full/160/2/163>. Ανακτήθηκε στις February 15, 2009.
79. ANL staff (2001). «ANL human health fact sheet—plutonium» (<https://web.archive.org/web/20130216175757/http://www.evs.anl.gov/pub/doc/Plutonium.pdf>) (PDF). Argonne National Laboratory. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.evs.anl.gov/pub/doc/Plutonium.pdf>) (PDF) στις 16 Φεβρουαρίου 2013. Ανακτήθηκε στις 16 Ιουνίου 2007.
80. WNA contributors (Μάρτιος 2009). «Plutonium» (<https://web.archive.org/web/20100330221426/http://www.world-nuclear.org/info/inf15.html>). World Nuclear Association. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.world-nuclear.org/info/inf15.html>) στις 30 Μαρτίου 2010. Ανακτήθηκε στις 28 Φεβρουαρίου 2010.
81. Bernard L. Cohen. «The Nuclear Energy Option, Chapter 13, Plutonium and Bombs» (<http://www.phyast.pitt.edu/~blc/book/chapter13.html>). Ανακτήθηκε στις 28 Μαρτίου 2011. (Online version of Cohen's book *Η πυρηνική ενεργειακή επιλογή* (Plenum Press, 1990) ISBN 0-306-43567-5).
82. Voelz, G. L. (1975). «Τι έχουμε μάθει για το πλουτώνιο από τα ανθρώπινα δεδομένα» (http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1975/10000/What_We_Have_Learned_about_Plutonium_from_Human.11.aspx). *Η ασφάλεια από την ακτινοβολία Εφημερίδα Υγειοφυσικής (The Radiation Safety Journal Health Physics)*: 29. http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1975/10000/What_We_Have_Learned_about_Plutonium_from_Human.11.aspx.
83. Welsome, Eileen (2000). *Τα αρχεία του πλουτωνίου: Μυστικοί ιατρικοί πειραματισμοί της Αμερικής στον Ψυχρό Πόλεμο*. Νέα Υόρκη: Random House. σελ. 17. ISBN 0-385-31954-1.
84. Miner 1968, σελ. 546
85. Roark, Kevin N. (2000). *Criticality accidents report issued* (https://web.archive.org/web/20081008180945/http://lanl.gov/news/index.php/fuseaction/home.story/story_id/1054/view/print). Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (http://www.lanl.gov/news/index.php/fuseaction/home.story/story_id/1054/view/print) στις 8 Οκτωβρίου 2008. Ανακτήθηκε στις 16 Νοεμβρίου 2008.
86. LANL contributors. «Raemer Schreiber» (http://www.lanl.gov/history/people/R_Schreiber.shtml). *Staff Biographies*. Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory. Ανακτήθηκε στις 16 Νοεμβρίου 2008.
87. McLaughlin, Thomas P.; Monahan, Shean P.; Pruvost, Norman L. (2000). *A Review of Criticality Accidents* (<https://web.archive.org/web/20070926101253/http://www.csirc.net/docs/reports/la-13638.pdf>). Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory, σελ. 17. LA-13638. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.csirc.net/docs/reports/la-13638.pdf>) στις 2007-09-26. <https://web.archive.org/web/20070926101253/http://www.csirc.net/docs/reports/la-13638.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2011-08-21.
88. DOE contributors. «Plutonium» (<https://web.archive.org/web/20090122022256/http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281>). *Nuclear Safety and the Environment*. Department of Energy, Office of Health Safety and Security. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281>) στις 22 Ιανουαρίου 2009. Ανακτήθηκε στις 7 Δεκεμβρίου 2008.
89. DOE contributors (1994). «Primer on Spontaneous Heating and Pyrophoricity – Pyrophoric Metals – Plutonium» (<https://web.archive.org/web/20070428220410/http://www.hss.energy.gov/NuclearSafety/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281>). Washington (DC): U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Safety, Quality Assurance and Environment. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.hss.energy.gov/NuclearSafety/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281>) στις 28 Απριλίου 2007. Ανακτήθηκε στις 21 Αυγούστου 2011.

Σημειώσεις

1. Αυτή δεν ήταν η πρώτη φορά που κάποιοι πρότεινε ένα στοιχείο να ονομαστεί "πλουτώνιο". Μία δεκαετία μετά την ανακάλυψη του βαρίου, ένας καθηγητής πρότεινε να μετονομαστεί σε πλουτώνιο επειδή το στοιχείο δεν ήταν βαρύ, όπως υποδηλώνει η ελληνική προέλευση του ονόματος. Έτσι, υποστήριξε ότι, δεδομένου ότι παράγεται από τη σχετικά νέα τεχνική ηλεκτρόλυσης, το όνομά του πρέπει να σχετίζεται με τη φωτιά. Έτσι, πρότεινε να ονομαστεί από τον Ρωμαίο θεό του κάτω κόσμου, Πλούτωνα (Pluto).
2. Γράφει ένα άρθρο που αναφέρεται σε μία συζήτηση του Σίμποργκ: Η προφανής επιλογή για το σύμβολο ήταν Pl, αλλά στην πραγματικότητα ο Σίμποργκ πρότεινε το Pu, όπως και ένα παιδί θα αναφωνήσει 'Pee you!' όταν μυρίσει κάτι κακό. Ο Σίμποργκ πίστευε πως θα δεχθεί πολλές κριτικές για την πρόταση αυτή, όμως η επιτροπή ονοματοδοσίας δέχτηκε την πρόταση χωρίς να φέρει καμία αντίρρηση Clark, David L.; Hobart, David E. (2000). «Reflections on the Legacy of a Legend: Glenn T. Seaborg, 1912–1999» (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>) (PDF). *Los Alamos Science* 26: 56–61, on 57. <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818011.pdf>. Ανακτήθηκε στις 2009-02-15.
3. Το δωμάτιο 405 του Εργαστηρίου του Τζώρτζ Χέρμπερτ Τζόουνς (George Herbert Jones), όπου πραγματοποιήθηκε η πρώτη απομόνωση πλουτωνίου, ανακηρύχθηκε εθνικό ιστορικό ορόσημο τον Μάιο του 1967
4. Κατά τη διάρκεια του Σχεδίου Μανχάταν, το πλουτώνιο συχνά αναφερόταν απλά ως 49: ο αριθμός 4 ήταν για το τελευταίο ψηφίο του 94 (ατομικός αριθμός του πλουτωνίου) και το 9 για το τελευταίο ψηφίο του πλουτωνίου - 239, το σχάσιμο ισότοπο για πυρηνικές βόμβες: Hammel, E.F. (2000). «The taming of "49" – Big Science in little time. Recollections of Edward F. Hammel, pp. 2–9. In: Cooper N.G. Ed. (2000). Challenges in Plutonium Science» (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818010.pdf>). *Los Alamos Science* 26 (1): 2–9. <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/00818010.pdf>. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2009.

Hecker, S.S. (2000). «Plutonium: an historical overview. In: Challenges in Plutonium Science» (<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/number26.htm>). *Los Alamos Science* 26 (1): 1–2. <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/pubs/number26.htm>. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2009.

5. Η Αμερικανική Εταιρεία των Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) συστάθηκε στην κατασκευή του Αντιδραστήρα Β ως Εθνικό Ιστορικό Ορόσημο Μηχανολόγων μηχανικών, τον Σεπτέμβριο του 1976.

Wahlen, R.K. (1989). *History of 100-B Area* (<https://web.archive.org/web/20090327001116/http://www.hanford.gov/doe/history/files/HistoryofBArea.pdf>) (PDF). Richland, Washington: Westinghouse Hanford Company. σελ. 1. WHC-EP-0273. Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://www.hanford.gov/doe/history/files/HistoryofBArea.pdf>) (PDF) στις 27 Μαρτίου 2009. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2009.

Τον Αύγουστο του 2008 ο Αντιδραστήρας Β ανακηρύχθηκε Εθνικό Ιστορικό Μνημείο.

«Weekly List Actions» (<http://www.nps.gov/history/nr/listings/20080829.HTM>). National Park Service. 29 Αυγούστου 2008. Ανακτήθηκε στις 30 Αυγούστου 2008.

6. Ο υπολογισμός της ισχύος βασίζεται στο γεγονός ότι το 1 kg πλουτωνίου-239 (ή ουράνιο-235) διασπάται απελευθερώνοντας ενέργεια της τάξης των 17 κιλοτόνων (kt), που οδηγεί σε στρογγυλοποιημένη εκτίμηση ότι 1,2 kg πλουτωνίου προκαλούν έκρηξη των 20 kt. Από το ποσό του 1 kg = 17 kt,

Garwin, Richard (4 Οκτωβρίου 2002). «Proliferation of Nuclear Weapons and Materials to State and Non-State Actors: What It Means for the Future of Nuclear Power» (http://www.fas.org/rlg/PNWM_UMich.pdf) (PDF). *University of Michigan Symposium*. Federation of American Scientists. Ανακτήθηκε στις 4 Ιανουαρίου 2009.

7. Μεγάλο μέρος αυτού του πλουτωνίου χρησιμοποιήθηκε για τον πυρήνα ενός τύπου θερμοπυρηνικών όπλων σχεδίου Teller–Ulam. Οι αποκαλούμενες βόμβες υδρογόνου είναι ένα είδος πυρηνικού όπλου που χρησιμοποιεί μια βόμβα σχάσης για να προκαλέσει πυρηνική σύντηξη βαρέων ισωτόπων υδρογόνου. Η ισχύς τους είναι συνήθως της τάξεως των εκατομμυρίων τόνων ισοδύναμου TNT σε σύγκριση με τους χιλιάδες τόνους ισοδύναμου TNT των συσκευών που βασίζονται μόνο στη σχάση. Emsley, 2001
8. Το οξειδίο ζirkονίου γαδολίνιου ($Gd_2Zr_2O_7$) έχει μελετηθεί επειδή μπόρεσε να διατηρήσει πλουτώνιο μέχρι και 30 εκατομμύρια έτη. Emsley, 2001
9. Το ιόν του PuO_2^+ είναι ασταθές στη διάλυση και θα είναι δυσανάλογο μέσα σε πλουτώνιο⁴⁺ και PuO_2^{2+} : Το πλουτώνιο⁴⁺ τότε οξειδώνει τα εναπομείναντα PuO_2^+ σε PuO_2^{2+} , και θα μειωθεί με τη σειρά του δημιουργώντας πλουτώνιο³⁺. Έτσι, τα υδατικά διαλύματα πλουτωνίου τείνουν την πάροδο του χρόνου κάνοντας μίγμα πλουτωνίου³⁺ και PuO_2^{2+} .

Crooks, William J. (2002). «Nuclear Criticality Safety Engineering Training Module 10 – Criticality Safety in Material Processing Operations, Part 1» (<https://web.archive.org/web/20060320153404/http://ncsp.llnl.gov/ncset/Module10.pdf>) (PDF). Αρχειοθετήθηκε από το πρωτότυπο (<http://ncsp.llnl.gov/ncset/Module10.pdf>) (PDF) στις 20 Μαρτίου 2006. Ανακτήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2006.

10. Υπήρξε μια σημαντική αρχισμένη πυρκαγιά πλουτωνίου στο Rocky Flats Plant κοντά στο Boulder, Κολοράντο το 1969.

Albright, David· O'Neill, Kevin (1999). «The Lessons of Nuclear Secrecy at Rocky Flats» (<https://web.archive.org/web/20080708220510/http://www.isis-online.org/publications/usfacilities/Rfpbrf.html>). *ISIS Issue Brief*. Institute for Science

Βιβλιογραφία

- CRC contributors (2006). David R. Lide, επιμ. *Handbook of Chemistry and Physics* (87th έκδοση). Boca Raton (FL): CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 0849304873.
- Emsley, John (2001). «Plutonium». *Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements* (<https://archive.org/details/naturesbuildingb0000emsl/page/n337>)–329. ISBN 0198503407.
- Greenwood, N. N.· Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd έκδοση). Oxford (UK): Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-3365-4.
- Heiserman, David L. (1992). «Element 94: Plutonium». *Exploring Chemical Elements and their Compounds* (<https://archive.org/details/exploringchemica01heis/page/337>). New York (NY): TAB Books. σελίδες 337–340 (<https://archive.org/details/exploringchemica01heis/page/337>). ISBN 0-8306-3018-X.
- Miner, William N.· Schonfeld, Fred W. (1968). «Plutonium». Στο: Clifford A. Hampel, επιμ. *The Encyclopedia of the Chemical Elements* (<https://archive.org/details/encyclopediaofch00hamp>). New York (NY): Reinhold Book Corporation. σελίδες 540 (<https://archive.org/details/encyclopediaofch00hamp/page/540>)–546. LCCN 68-29938.
- Stwertka, Albert (1998). «Plutonium». *Guide to the Elements* (<https://archive.org/details/guidetoelements00stwe>) (Revised έκδοση). Oxford (UK): Oxford University Press. ISBN 0-19-508083-1.

Εξωτερικοί σύνδεσμοι

- William N. Miner· Fred W. Schonfeld (1968). «Plutonium». Στο: Clifford A. Hampel, επιμ. *The Encyclopedia of the Chemical Elements* (<https://archive.org/details/encyclopediaofch00hamp>). New York (NY): Reinhold Book Corporation. σελίδες 540 (<https://archive.org/details/encyclopediaofch00hamp/page/540>)–546. LCCN 68-29938.

Ανακτήθηκε από "<https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=Πλουτώνιο&oldid=10668234>"