



Politechnika Warszawska

Wydział Elektryczny

Studium Doktoranckie

2004.04.16

Krzysztof Lenarczyk

Temat: Możliwości wykorzystania toru w energetyce.



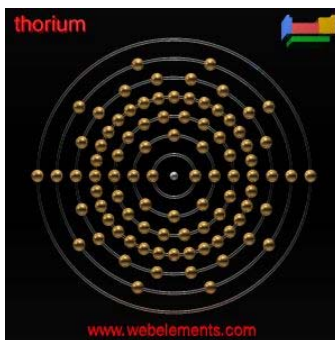
Spis treści:

1. Charakterystyka toru.
2. Zasoby toru na tle zasobów uranu.
3. Torowy cykl paliwowy.
4. Reaktory wykorzystujące torowy cykl paliwowy.
5. Bezpieczeństwo radiologiczne torowego cyklu paliwowego.
6. Zawartość toru w pożywieniu na tle innych pierwiastków.

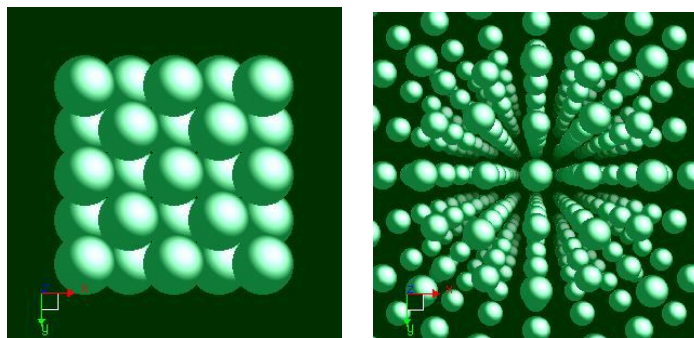
1.Charakterystyka toru [1-8]

TOR - symbol **Th** (z łac. *thorium*)

90
Th
232.0381(1)



Rys 1. Schemat powłkowej struktury toru (nie jest to struktura atomu toru)[3].



Rys 2. Stały stan skupienia toru – struktura krystaliczna[3].

Grupa	Okres	Liczba atomowa	Liczba masowa	Stan skupienia (20°C, 1atm.)
Aktynowce	7	90	232.0381	ciało stałe
Konfiguracja elektronowa :		$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 5d^{10} 4f^{14} 6p^6 7s^2 6d^2$		



Rys 3. Tor [3].



Odkrywca toru - J.J. Berzelius 1779-1848) [1].



Nazwa pierwiastka pochodzi od słowa "Thor" (staroskandynawski Bóg piorunów), został odkryty w Szwecji, w 1828r przez J.J Berzelius. Jest srebrno-szarym, radioaktywnym metalem .

Tor jest aktynowcem z III grupy układu okresowego. Jest to **pierwiastek radioaktywny** (o średniej aktywności chemicznej)

Rys. 4 Tor – skruszony i w kawałkach [4]. o bardzo długim okresie połowicznego rozpadu - rzędu 10 mld lat, wykazujący podobieństwo do pierwiastków podgrupy w IV grupie, o własnościach zasadowych (liczba atomowa 90, masa atomowa 232,038). W związkach jest czterowartościowy.

W torze naturalnym prawie 100% stanowi izotop ${}_{90}\text{Th}^{232}$, który jest izotopem rodnym i z którego wyniku absorpcji otrzymuje się w reaktorze izotop rozszczepialny uranu ${}_{92}\text{U}^{233}$. Zaś w uranie naturalnym 0,7% stanowi uran rozszczepialny U-235, reszta czyli 99,3% jest dla elektrowni jądrowych nie przydatne.

Tor występuje w dwóch odmianach alotropowych: α (do 1400°C) i β (powyżej 1400°C). Odmiana α ma kryształy sześciennie scentrowane krawędziowo, odmiana β kryształy sześciennie przestrzennie scentrowane.

Najważniejsze związki :

-dwutlenek toru ThO_2

oraz łatwo rozpuszczalne w wodzie

-sole:

-czterochlorek toru ThCl_4 ,

-siarczan torowy $\text{Th}(\text{SO}_4)_2$,

-azotan torowy $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$.

Tor jest srebrzystobiałym **metalem**, niezbyt twardym i ciągliwym o temperaturze topnienia 3500° C, temperaturze wrzenia 4500° C i ciężarze właściwym 11,3 (metal ciężki). Jest odporny na działanie czynników atmosferycznych i kwasów.

Do minerałów własnych toru należą:

-toryt występujący w rejonie Oslo w Norwegii,

-torianit $(\text{Th,U})\text{O}_2$ występujący na Cejlonie.

Towarzyszy też minerałom innych pierwiastków, jak: **monacyt** (złoża brazylijskie), **cyrkon**, **samarokit**.

Właściwości chemiczne:

Ze względu na izotropową strukturę krystaliczną własności toru nie zależą, tak bardzo jak w przypadku uranu, od sposobu obróbki mechanicznej i cieplnej. W wysokiej temperaturze reaguje z tlenem, wodorem, azotem, węglem i parą wodną. Przy krótkim kontakcie z powietrzem nie ulega utlenieniu w temperaturze pokojowej. Długotrwałe działanie powietrza powoduje matowienie tego metalu. Łatwo rozpuszcza się w kwasach. W związkach występuje na +4 stopniu utlenienia. Jony toru w roztworach wodnych są bezbarwne. Czysty tor metaliczny wykazuje bardzo silną odporność korozyjną na działanie wody, natomiast wodór wywołuje silną korozję toru nawet przy stosunkowo niskich temperaturach. Do temperatury rzędu 500° C nie stwierdzono korozyjnego działania ciekłego sodu. Zaś w temperaturach 500-700°C nie stwierdzono oddziaływania z takimi materiałami kosztownymi jak stal nierdzewna, cyrkon i jego stopy, aluminium, magnez (magnox), tantal, wolfram itp. Ze względu na swoją budowę krystaliczną tor jest odporny na działanie napromieniowania w reaktorze, oraz jego własności nie zależą jak w przypadku uranu od obróbki mechanicznej i cieplnej. Tor można obrabiać zwykłymi metodami. Własności fizyczne toru z punktu widzenia jego zastosowania w paliwie jądrowym są korzystniejsze niż w przypadku uranu. Wynika to z jego większej przewodności cieplnej, mniejszego współczynnika rozszerzalności termicznej i mniejszej gęstości.

Zastosowanie:

Tor ma stać się w niedalekiej przyszłości bardzo energetycznym paliwem do elektrowni atomowych oraz w przemyśle optycznym i elektronice. Metaliczny tor stosuje się do powlekania drucików wolframowych w lampach elektronowych i jako adsorbent gazów w aparatach wysokopróżniowych. Szersze zastosowanie ma **dwutlenek toru**, który służy jako katalizator w procesie otrzymywania syntetycznej benzyny i do wyrobu siatek Auera - wykonanych w 99% z dwutlenku toru i w 1% z dwutlenku ceru, rozżarzających się w płomieniu gazowym i dających intensywne, białe światło.

Dwa najważniejsze pierwiastki paliworodne.

Tablica z charakterystycznymi danymi [2,5]:

Tor a Uran

Tor - ${}_{90}\text{Th}^{232.0381}$

Liczba elektronów: **90**
Liczba neutronów: : **142**
Liczba protonów: **90**
Elektroujemność (Allred-Rochow, Pauling):**---,1.7**
Stopień utlenienia:**-(+3),+4**
Przewodność elektryczna: **$66.6 \cdot 10^5 \text{ 1/(m} \cdot \Omega)$**
Gęstość (293 K): **11.7 g/cm^3**
Temperatura topnienia: : **1750°C , **2023 K****
Temperatura wrzenia: **3800°C , **4073 K****
Ciepło właściwe: **$27,7 \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$**
Ciepło topnienia: **13.8 kJ/mol**
Ciepło parowania: **575 kJ/mol**
Przewodność cieplna: **$54 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$**
Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej: **$12 \cdot 10^{-6} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$**
Moduł sprężystości: **$6,86 \cdot 10^{10} \text{ (n} \cdot \text{m}^{-2})$**



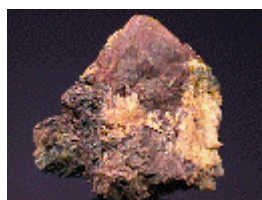
Rys 5. Tor [6].

Uran - ${}_{92}\text{U}^{238.02891}$

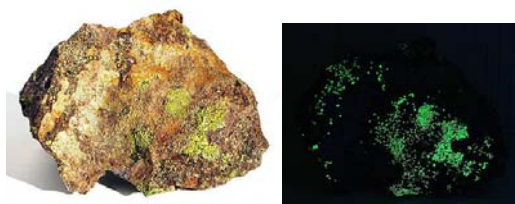
Liczba elektronów: **92**
Liczba neutronów: : **146**
Liczba protonów: **92**
Elektroujemność (Allred-Rochow, Pauling):**---,1.3**
Stopień utlenienia: **+3, +4, +5, +6**
Przewodność elektryczna: **$33.3 \cdot 10^5 \text{ 1/(m} \cdot \Omega)$**
Gęstość (293 K): **19.04 g/cm^3**
Temperatura topnienia: **1132°C , **1405 K****
Temperatura wrzenia: **33818°C , **4091 K****
Ciepło właściwe: **25,12(20°C)**
Ciepło topnienia: **27.66 kJ/mol**
Ciepło parowania: **422 kJ/mol**
Przewodność cieplna: : **$27.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$**
Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej: **$13 \cdot 10^{-6} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$**
Moduł sprężystości: **$1,56 \cdot 10^{11} \text{ (n} \cdot \text{m}^{-2})$**



Rys 6. Uran [6].



Rys 7. Ruda toru [7].



Rys 8. Ruda uranu a obok ta sama ruda świecąca w ciemności [1].

Nuklid	Zasobność [%]	Masa	Spin	Okres półrozpadu	Rodzaj rozpadu	Obraz rozpadu
²²⁶ Th	0	226.025	0	30.6m	α	View
²²⁷ Th	0	227.028	3/2	18.72d	α	View
²²⁸ Th	0	228.029	0	1.913y	α	View
²²⁹ Th	0	229.032	5/2	7.34E03y	α	View
²³⁰ Th	0	230.033	0	7.54E04y	α	View
²³¹ Th	0	231	5/2	1.063d	β^-	View
²³² Th	100	232.038	0	1.40E10y	α	View
²³³ Th	0	233	1/2	22.3m	β^-	View
²³⁴ Th	0	234	0	24.1d	β^-	View

[Legenda](#)

Tabela 1. Przedstawia izotopy toru [8].

Nuklid	Zasobność [%]	Masa	Spin	Okres półrozpadu	Rodzaj rozpadu	Obraz rozpadu
²³⁰ U	0	230	0	20.8d	α	View
²³¹ U	0	231	5/2	4.20d	EC	View
²³² U	0	232.037	0	70y	α ,SF	View
²³³ U	0	233.04	5/2	1.59E05y	α ,SF	View
²³⁴ U	0.0055	234.041	0	2.47E05y	α ,SF	View
²³⁵ U	0.72	235.044	7/2	7.04E08y	α ,SF	View
²³⁶ U	0	236.046	0	2.34E07y	α ,SF	View
²³⁷ U	0	237	1/2	6.75d	β^-	View
²³⁸ U	99.27	238.051	0	4.47E09y	α ,SF	View
²³⁹ U	0	239	5/2	23.5m	β^-	View
²⁴⁰ U	0	240	0	14.1h	β^-	View

[Legenda](#)

Tabela 2. Izotopy uranu [8].

2. Światowe zasoby toru na tle zasobów uranu

Tor jest bardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem w przyrodzie niż uran. Szacuje się, że średnia zawartość toru w skałach kontynentalnych wynosi ok. 8g/t. Występuje w skorupie ziemskiej czterokrotnie częściej niż uran (złoża uranu są bardzo rozproszone). Zawartość w rudach wynosi (4%) i jest o wiele wyższa niż zawartość uranu w rudach uranowych (0.2 - 0.01%). Zwiększa to znacznie efektywność procesu wydobywania. Jego minerały nie tworzą samodzielnych złóż. Zatem pozyskiwany jest przede wszystkim z toronośnych piasków monacytowych, także z piasków cyrkonowych bogatych w Th oraz innych kopalin. Pierwiastek ten został wykryty w piaskach monacytowych, złożach okruchowych i typu żyłowego w konglomeratach dekambrskich, karbonatach i w skałach solonośnych. W rudach występuje najczęściej z innymi pierwiastkami, jak tytan, cyna, cyrkon, ziemie rzadkie. Uran w przyrodzie występuje w ok. 150 minerałach, z których wartość przemysłową ma kilkanaście. Surowcami przemysłowymi są rudy uranu zawierające co najmniej 0,02%. Eksploatowane obecnie rudy są to rudy polimetaliczne, w których uran jest tylko produktem ubocznym. Naturalna promieniotwórczość tego pierwiastka stanowi problem dla górnictwa i przeróbki kopalin, składowania ich odpadów oraz użytkowników.

Głównym przemysłowym źródłem toru jest monacyt zawierający zwykle 3-9% toru. W monacytach tor występuje wspólnie z pierwiastkami ziem rzadkich. Złoża monacytów są poszukiwane i eksploatowane z uwagi na pierwiastki towarzyszące a tor jest otrzymywany jako produkt uboczny. Największe złoża monacytów znajdują się w Indiach (Travancore).

Największe złoża toronośne znajdują się : w Brazylii (wzdłuż wybrzeży Atlantyku), w Australii (Queensland, New South Wales), w Egipcie, na Cejlonie, w Korei , w USA (stany Idaho, north Carolina, South Carolina), na Malajach, w Indonezji, w RPA , w Kanadzie. Złoża w Australii są bogate w tytan i cyrkon, złoża na Malajach i w Indonezji - w cynę, Kanadzie tor występuje w złożach uranonośnych. Zasoby światowe oceni się na 1,2 mln t ThO_2 .

Dane dotyczące światowej produkcji toru metalicznego i związków toru (głównie ThO_2) nie są publikowane. Można je oceniać na podstawie podaży koncentratów monacytowych, z których są pozyskiwane.

Zasoby uranu są klasyfikowane w dwóch kategoriach, w zależności od kosztów wydobycia i przerobu na standardowe koncentraty uranowe. Każda kategoria dzieli się na dwie grupy:

- zasoby pewne (Reasonably Assured Resources), tzn. Zasoby rudy znajdującej się w znanych złożach o wielkości, zawartości procentowej uranu oraz głębokości zalegania takich,

że w ramach kosztów określających kategorię, rudę można wydobyć i przerobić na koncentrat wg. współczesnej technologii.

- zasoby możliwe (Estimated Additional Resources), tzn. Zasoby rudy, których występowania należy się spodziewać na podstawie przesłanek geologicznych.

Podawane w raportach zasoby dotyczą uranu i toru zawartego w rudach uranu i toronośnych. Poza tym złoża tych pierwiastków występują w znacznych ilościach w wodach oceanów, gdzie zasoby ich są tysiąc razy większe.

Uran występuje praktycznie we wszystkich rudach fosforytów w ilościach 0,0012-0,018%. Występuje on też w łupkach bitumicznych w zawartości 0,01-0,03%. Szczególnie duże zasoby łupków występują w Szwecji i USA. Największa kopalnia rud uranu znajduje się w Rössing w Namibi. Niektóre złoża węgla brunatnego i torfu zawierają znaczne ilości uranu, uzyskuje go się przez wydzielenie z popiołów. Uran jest także zawarty w magnanowych anomaliiach na dnie morskim w termalnych szlamach Morza Czerwonego i Morza Czarnego. Występuje też w Kanadzie, Francji, Czechach, Australii, RPA, Ukraina, Argentyna, Kazachstan, Nigrze, Brazylii. Udokumentowane zasoby rud uranu, których wydobycie jest opłacalne przy kosztach nie przekraczających 800 USD/kg U wynoszą około 2,1 mln t U

Brak jest danych o wielkości zużycia surowców toru na świecie (szacuje się na 100t/r) Th_2O . Tylko kilka procent surowców toru użytkowanych jest jako paliwo w kilku reaktorach atomowych. Zapotrzebowanie na te surowce w większości dziedzin, w tym w energetyce słabnie, powodując spadek produkcji światowej ok. trzy krotny w porównaniu do połowy lat 80-tych.

Scharakteryzowanie rynku surowców uranu jest niemożliwe ze względu na ich nadal strategiczne znaczenia, a dane o ich obrotach nie są zazwyczaj publikowane. Wykorzystanie uranu w energetyce jądrowej wzrasta, jednak nie w takim tempie jak w latach 70-tych i na początku lat 80-tych. Mimo tego ceny surowców toru utrzymują się na stałym poziomie.

Ceny toru metalicznego (99,9%) wynoszą obecnie około 150\$/oz, zaś ceny uranu (które od kilku lat są na bardzo niskim poziomie, mimo wzrostu w roku 2001 na poziom cen z początku lat 90-tych) 22-27 \$/kgU [13,14].

Surowiec/Rok	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Tlenek toru ¹	64.45	82.50	82.50	82.50	82.50	82.50
Azotan toru ²	14.32	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00
Koncentrat uranu ³	14.7	12.1	8.9	8.7	8.2	9.5

¹99.0% Th₂O, rynek amerykański, USD/kg Th₂O,

²do powłok elementów żarowych, cena jak wyżej,

³USD/lb U₃O₈.

Tabela 3. Ceny surowców w latach 1996-2001 [16-17].

Gospodarka krajowa torem i uranem.

Kraj	Zasoby toru (tys. ton)	Zasoby uranu (tys. ton)
Australia	300	633
Kazachstan	-	500
Kanada	100	700
Uzbekistan	-	
Brazylia	16	162
Rosja	-	1000
USA	6,8	2198
Chiny	-	1770
Indie	290	-
Norwegia	170	-
Malajach	4,5	-
Południowa Afryka	35	1113
Pozostałe	90	2300
Ogółem	1200	8671

Mineralizację torową, bez znaczenia praktycznego stwierdzono w Bogatyni, Szklarskiej Porębie i Wolowej Górze (Sudety Zachodnie) oraz Różance, zaś złoża rud Uranu rozpoznano w Zapadlisku Podlaskim oraz w Sudetach - nie mają praktycznego znaczenia. W Polsce nie prowadzi się produkcji ani wydobywania tych pierwiastków. Tor i jego związki i stopy są importowane nieregularnie z Kanady, w ostatnich latach w ogóle nie sprowadzono tego surowca. Zaś uran i związki uranu sprowadzane były z Rosji i Czech, obecnie są ze Szwecji na głównie na potrzeby Instytutu Jądrowego w Świerku.[9-17]

Tabela 4. zawiera złoża toru i uranu na świecie[13,16,17].

3. Torowy cykl paliwowy

3.1 Pojęcie cyklu paliwowego – charakterystyka ogólna

Cykle **paliwowym** nazwano system operacji przemysłowych i procesów technologicznych, mających na celu przygotowanie paliwa do reaktorów jądrowych, a także przerób paliwa wypalonego w reaktorze i składowanie odpadów. Umownie jądrowy cykl paliwowy dzieli się na trzy stadia:

-początkowe (zawiera obiekty cyklu od wydobycia rudy do wytwarzania elementów paliwowych),

-zasadnicze,

-końcowe (składowanie, przeróbka, transport, usuwanie paliwa wypalonego i odpadów).

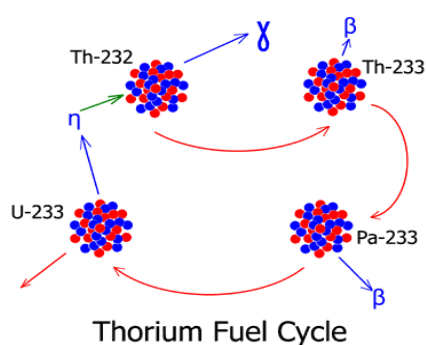
Obecnie najmniej jest opanowana końcowa część cyklu.

Zasadą jest, że przy prowadzeniu różnego rodzaju uogólniających badań jądrowego cyklu paliwowego jako jego elementy (etapy) rozpatruje się nie rzeczywiste, a tak zwane modelowe obiekty. Ich charakterystyki dobiera się w oparciu o uogólnienie charakterystyk obiektów działających lub wyników obliczeń i ocen dla planowanych bądź projektowych obiektów.

Cykl paliwowy może być otwarty lub zamknięty. W *cyklu paliwowym zamkniętym* (zwanym również cyklem z recykлизacją paliwa) paliwo wypalone podlega procesowi przerobu, w wyniku którego odzyskuje się materiały rozszczepialne nie wypalonego do końca paliwa w reaktorze. Są one ponownie wykorzystywane do wytwarzania świeżych elementów paliwowych.

W *cyklu paliwowym otwartym* (zwanym również cyklem bezrecykлизacją paliwa) paliwo wypalone nie jest regenerowane: wypada wtedy bardzo trudne technologicznie ogniwo cyklu paliwowego- *przerób paliwa wypalonego*. Paliwo wypalone jest wtedy składowane podobnie jak odpady promieniotwórcze, z tym że zazwyczaj sposób jego składowania zapewnia możliwość poddania go przerobowi w przyszłości[2,9,10].

3.2. Torowy cykl paliwowy



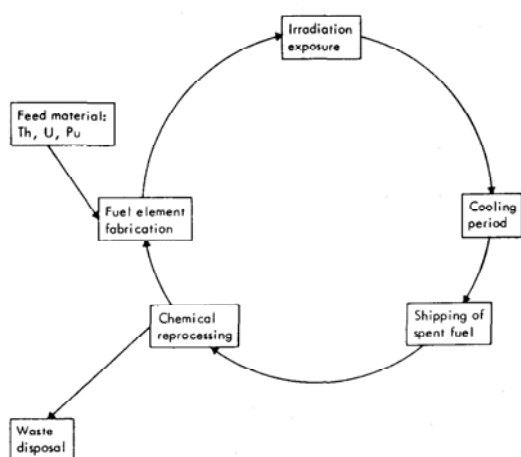
Rys 9. Schemat torowego cyklu i formowanie w ciała paliwowe paliwowego [18].

Torowy cykl paliwowy rozpoczyna się zakupem materiałów. Standardowe materiały to zwykła sól $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Jako materiały łatwo rozpadające się używa się wzbogacony ^{235}U , Pu lub ^{233}U , wytwarzany gdzieś indziej. Materiały te są dostarczone jako oczyszczone związki chemiczne w dogodnej formie. W następnej fazie materiały te są chemicznie przetwarzane w potrzebne związki chemiczne mieszane

Dla niektórych typów reaktorów paliwo może być w postaci kulek lub pręcików. Ciała paliwowe są dołączone do odpowiednich materiałów i składowane w elementach paliwowych. Po odpowiednich testach i przeglądach, elementy paliwa są ładowane do reaktora. W reaktorze, materiały rozkładają się, są „palone”, podczas gdy niektóre cząstki toru są zamieniane w ^{233}U . Po wystarczającym napromieniowaniu, paliwo jest wypuszczane. Jest wtedy wysoce radioaktywne i musi być składowane przez jakiś czas, tak aby produkty

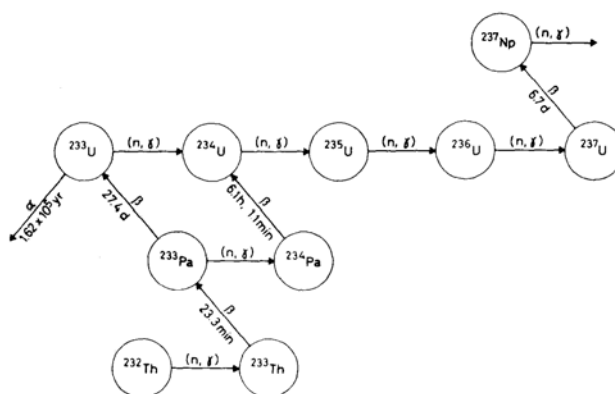
ulegające rozpadowi mogły się rozpaść do racjonalnego poziomu dla następnego przetwarzania. Nawet po chłodzeniu, zużyte elementy paliwa muszą być bardzo dokładnie chronione.

Następnie paliwo musi być mechanicznie albo chemicznie neutralizowane a chemicznie przetwarzane, aby usunąć produkty rozpadające się oraz by oddzielić uran, tor i pluton. Materiały odnawialne zamykają cykl paliwowy i są wykorzystywane do ponownej produkcji paliwa. Materiały te są w jakimś stopniu radioaktywne – zależy to od oddzielenia rozkładających się produktów i czasu tworzenia ^{233}U - produktów ubocznych. Pomimo, że cykl paliwowy toru jest podobny do cyklu uranowo – plutonowego, to ponowne przetwarzanie torowych elementów paliwowych stwarza mniejsze problemy niż w przypadku paliwa uranowego.



1.Feed materials Th, U, Pu – wprowadzenie materiałów rozszczepialnych, 2. Fuel elements fabrication – produkcja elementów paliwa, 3. Irradiation exposure – podanie elementów paliwa napromienianiu, 4. Cooling period – okres chłodzenia, 5. Shipping of spent fuel – transport zużytego paliwa, 6. Chemical reprocessing – recykling, 7. Waste disposal – usunięcie odpadów (składowanie).

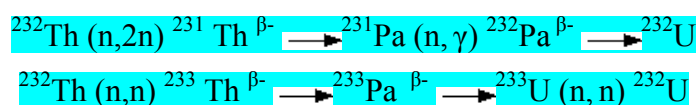
Rys 10. Poglądowy schemat torowego cyklu paliwowego [19].



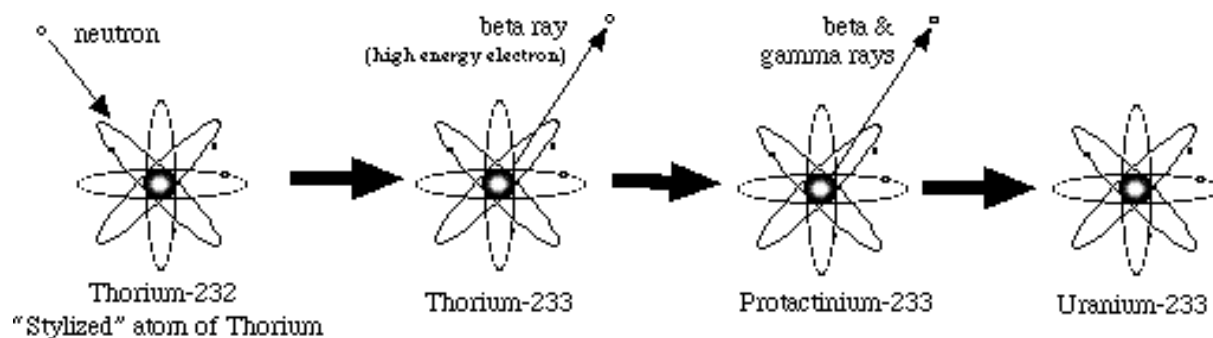
Rys11. Reakcja jądrowa przeistoczenia ^{232}Th w ^{233}U [19].

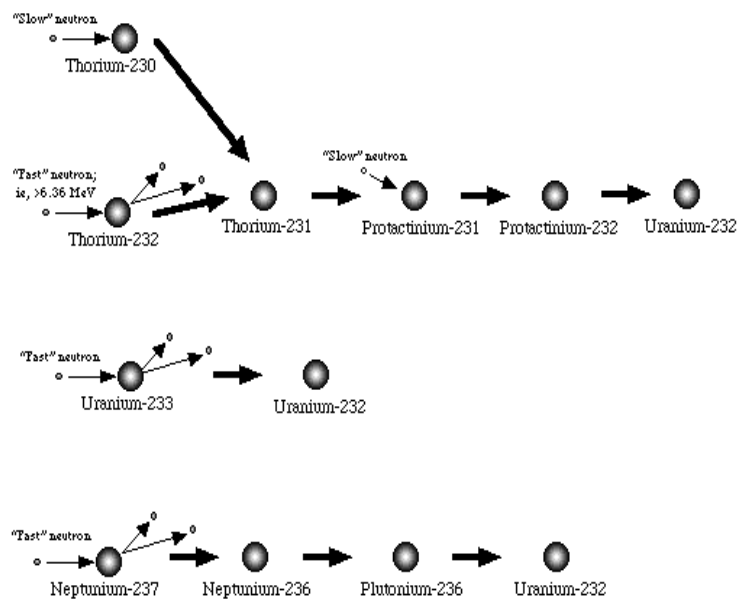
Użycie toru jako paliwa w reaktorach jest oparte na procesie (n,γ) wykorzystującym ^{232}Th . Pozostałe jądra ^{232}Th są niestabilne i pod wpływem emisji promieni beta rozkładają się

na ^{233}Pa - Te jądra są również beta niestabilne i rozkładają się na ^{233}U – emitent promieni alfa. Jądra ^{233}U są rozkładane przez neutrony termiczne. Średnia liczba neutronów wyemitowanych przypadających na jeden zaabsorbowany neutron (η) jest większa dla ^{233}U niż dla ^{235}U (poniżej 40 keV η dla ^{233}U – to nawet więcej niż dla ^{239}Pu). Dla najbardziej znaczących radionuklidów, całkowita stała gamma, charakteryzująca promieniowanie gamma, jest równa: dla ^{212}Pb - $K_\gamma \approx 660$ R/h, dla ^{212}Bi - $K_\gamma \approx 520$ R/h, dla ^{208}Tl - $K_\gamma \approx 1,5 \cdot 10^4$ R/h. Szczególnie wysoka jest zawartość dla ostatniego radionuklidów. Maksymalna koncentracja radionuklidu ^{232}U w końcu kampanii w płaszczu reaktora prędkiego wynosi 50 - 120g 1t ^{233}U .



Rys 12. Podstawowe łańcuchy przemian jądrowych, prowadzących do powstania ^{232}U w paliwie torowym –produkcja ^{233}U [27].





Rys 13. Transformacja toru w uran [25].

^{232}U jest punktem początkowym rozpadu w łańcuchu prowadzącym do stabilnego izotopu ^{208}Pb . W procesie rozpadu powstają produkty wysoce gamma aktywne – ^{212}Bi i ^{202}Tl . Produkty rozpadu ^{232}Th są oddzielane w przetwarzaniu chemicznym, ale ^{232}U wychodzi z ukończonym produktem ^{233}U , a ^{228}Th powstaje z ^{232}Th . Dlatego też, oba uran i tor- są wysoce gamma aktywne zaraz po ponownym przetwarzaniu.

Do wad przetwarzania paliwa torowego zalicza się też to, że:

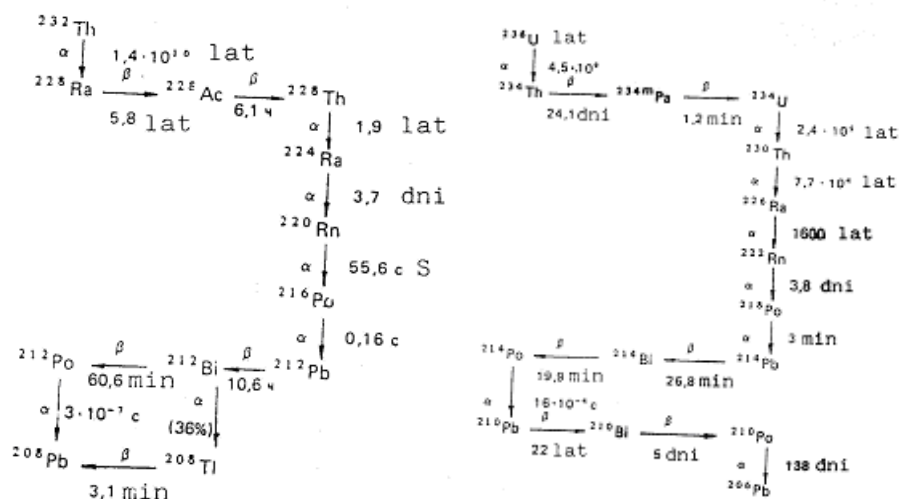
- paliwo torowe wymaga silniejszych rozpuszczalników np. bardziej skoncentrowanego kwasu azotowego i obecności fluoru jako katalizatora,
- paliwo torowe musi być przetwarzane przez urządzenia dużej wielkości w mniejszym stopniu niż odpowiednie paliwa uranowe,
- niektóre utrudnienia mogą wymagać większych nakładów lub uniemożliwić wytwarzanie pewnych paliw w fabryce zaprojektowanej do produkcji paliw uranowych [18].

Ważną cechą tego cyklu jest możliwość, bez istotnego obniżenia współczynnika konwersji, otrzymywania w blankietach torowych ^{233}U . Można przy tym uniknąć trudności, związanych z otrzymywaniem ^{233}U w rdzeniu. Uzyskiwany w płaszczu ^{233}U zawiera mniej ^{232}U , którego produkty rozpadu w znacznym stopniu decydują o trudnościach technologicznych zewnętrznego cyklu paliwowego. W efekcie małej gęstości strumienia neutronów w płaszczu maleje szkodliwy wpływ ^{233}Pa .

Z powodu wyższego spalania i lepszej wydajności termicznej, niektóre paliwa torowe mogą być produkowane bez wysokich dodatkowych kosztów.

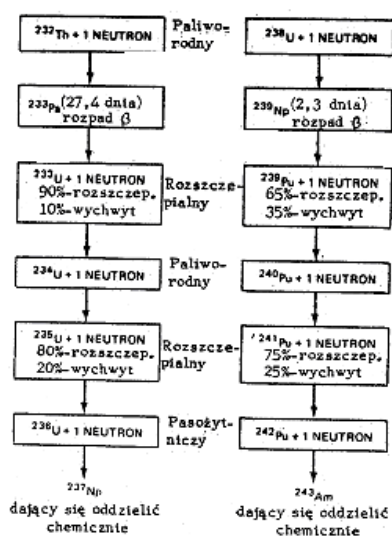
Ważną cechą torowego cyklu jest to, że w reakcjach zachodzących liczba długożyjących, radioaktywnych transuranowców (w cyklu uranowym są to głównie izotopy plutonu (Pu), ameryku (Am) i kiuru (Cm)) jest znacznie mniejsza, a właśnie one są źródłem kłopotów związanych ze **składowaniem radioaktywnych "popiołów"**. W cyklu torowym jedynym długożyjącym transuranowcem jest izotop neptunu (^{237}Np), produkowany w bardzo niewielkich ilościach, w porównaniu na przykład do ilości ^{243}Am , który jest jego odpowiednikiem w cyklu uranowym. Po drugie, w cyklu torowym produkowane są jedynie śladowe ilości ^{239}Pu , izotopu, który odgrywa istotną rolę w przemyśle zbrojeniowym. W odpadach uranowych występują względnie trwałe radionuklidy ^{232}UTh ($T_{1/2} = 7,6 \cdot 10^4$ lat) produkt jego rozpadu ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1,610^3$ lat). W odpadach torowych najbardziej trwałe radionuklid ^{228}Ra ma okres półrozpadu $T_{1/2} = 5,8$ lat, jest to wartość znacznie niższa niż dla wymienionych nuklidów promieniotwórczych z szeregu uranowego. Aktywność odpadów torowych opada o wiele szybciej niż aktywność odpadów uranowych.

[19 - 27].



Rys14. Schemat rozpadu promieniotwórczego szeregu torowego (a) i uranowego (b) [27]

3.3. Torowy a uranowy cykl paliwowy



Rys 15. Budowa izotopowego łańcucha systemów paliwowych $Th-^{233}$ i $^{238}U-^{239}Pu$ [26].

W uproszczonym zestawieniu przedstawiającym dwa izotopowe schematy, pokazano podobieństwo i różnicę omawianych systemów. W systemie torowym główną różnicą jest przejściowe powstawanie ^{233}Pa , który jest silnym pochłaniaczem neutronów i którego rozpad jest powolny. Ponieważ w trakcie rozpadu ^{233}Pa powstaje rozszczepialny ^{233}U , kontrola reaktywności w czasie wyłączenia reaktora jest skomplikowana. W widmie neutronów termicznych, ^{233}U ma dużo niższe alfa (σ_c/σ_f), a zatem wyższe eta $\eta/\nu/(1+\alpha)$ niż ^{239}Pu . Ta różnica w eta nie jest tak duża, jak mogła by sugerować różnica w alfa, ponieważ ^{239}Pu ma większy ν lub większą liczbę neutronów powstających w trakcie rozszczepienia. W obszarach termicznej i epitermicznej energii ^{233}U przez cały okres wypalania osiąga średnio wyższy współczynnik przemiany niż można uzyskać stosując pluton lub ^{235}U . Zatem w systemie torowym czas trwania reaktywności może być dłuższy, co spowoduje zwiększony uzysk materiału rozszczepialnego na końcu cyklu paliwowego. W reaktorach prędkich współczynnik powielania przy cyklu $^{232}Th - ^{233}U$ maksymalnie może osiągnąć wartość 1,2. Mimo, że jest on niższy niż współczynnik powielania w systemie plutonowym (1,6), lecz jest jeszcze znaczący. Tym bardziej, że w praktyce różnice między tymi współczynnikami nie są tak duże. Dla dużych systemów a tlenkami plutonu i uranu współczynnik powielania wynosi około 1,35 podczas gdy w systemie torowym współczynniki te mogą osiągnąć wartości bliskie maksymalnej. Tor metaliczny jako materiał płaszcz reaktora powinien być dopuszczalny, ponieważ posiada znacznie lepszą stabilność radiacyjną niż uran. W reaktorach termicznych najistotniejszą zaletą torowego cyklu paliwowego w porównaniu

z cyklem, uranowym jest potencjalnie wysoki współczynnik przemiany (WP). W reaktorze, każda jednostka zużytego paliwa produkuje WP jednostki paliwa rozszczepialnego, a potem zużycie paliwa jądrowego netto jest proporcjonalne do $1/WP$. Jeśli, pozostałe parametry będą stałe, typowy reaktor wodny o współczynniku przemiany 0,6 będzie zużywał dwukrotnie więcej paliwa na jednostkę wytworzonej energii niż reaktor z torowym cyklem paliwowym, którego współczynnik przemiany wynosi 0,8. A zatem wyższy współczynnik przemiany prowadzi bezpośrednio do obniżenia kosztów zużycia paliwa całkowitych kosztach cyklu paliwowego.

Tor ma dużo mniejszy przekrój czynny i wyższy próg energetyczny dla rozszczepień niż ^{238}U . W konsekwencji, małego efektu rozszczepienia neutronami prędkimi tor niewiele wpływa na polepszenie współczynnika powielania. Jednak przyczynia się do zmniejszenia reaktywności, gdyż wzrost efektu prędkiego wpływa na straty sodu. Zastosowanie torowego cyklu w reaktorach prędkich zmniejsza problemy związane z bezpieczeństwem [26,27].

4. Reaktory wykorzystujące torowy cykl paliwowy

4.2. Budowa i klasyfikacja reaktorów jądrowych

Urządzenie, w którym zachodzi kontrolowana reakcja rozszczepienia nazywamy reaktorem jądrowym.

Część reaktora, w której znajduje się materiał rozszczepialny zwany paliwem jądrowym, nazywa się rdzeniem. Rdzeń reaktora otoczony jest zwykle warstwą materiału, zwaną reflektorem, która „odbija” z powrotem znaczną część neutronów uciekających z rdzenia.

Zastosowanie reflektora pozwala na zmniejszenie ucieczki neutronów z rdzenia, co prowadzi do zmniejszenia wymiarów krytycznych i masy krytycznej oraz do polepszenia warunków pracy reaktora. Wytwarzana w reaktorze energia jest odbierana w postaci ciepła przez czynnik chłodzący, zwany chłodziwem przepływający przez rdzeń reaktora. Całość układu znajduje się w osłonie, której zadaniem jest ochrona termiczna i biologiczna otoczenia.

W większości obecnie budowanych reaktorów energetycznych stosowane są cylindryczne elementy paliwowe. Składają się one z cienkościennej szczelnie zespawanej rurki, zwanej koszulką, w której znajduje się materiał rozszczepialny w postaci pastylek. Pastylki paliwowe są wykonane najczęściej z tlenków lub węglików uranu. W czasie pracy reaktora, w wyniku rozszczepień jąder izotopów rozszczepialnych, w pastylkach paliwowych powstają silnie promieniotwórcze produkty rozszczepienia, które wydostają się z pastylek do

przestrzeni między pastylkami a koszulką. Zadaniem koszulki jest zatrzymanie ich wewnątrz elementu paliwowego, gdyż ich wydostanie się stanowiłoby poważne zagrożenie dla personelu i uniemożliwiłoby normalną pracę reaktora. Koszulki elementów paliwowych są wykonane zwykle ze stali nierdzewnej, stopów cyrkonu lub stopów magnezu. Ze względów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych elementy paliwowe są grupowane w tzw. kasety paliwowe o przekroju kwadratu lub sześciokąta.

Między kasetami paliwowymi w rdzeniu reaktora lub wewnątrz kaset są umieszczone pręty regulacyjne wykonane z materiału silnie pochłaniającego neutrony. Są one przeznaczone do sterowania reaktorem. Energia z reaktora jądrowego jest odbierana w postaci ciepła przez chłodnictwo przepływające przez rdzeń. Jako chłodziwa są stosowane ciecze (H_2O , D_2O), gazy (He , CO , CO_2) lub ciekłe metale (Na).

Chłodziwo przepływające przez rdzeń krąży w obiegu zamkniętym, który obejmuje reaktor, rurociągi, pompę obiegową i wymiennik ciepła, zwany wytwornicą pary. Obieg ten jest nazwany obiegiem pierwotnym. Para wytworzona w wytwornicy pary napędza turbinę parową, a po skropleniu się w kondensatorze i podgrzaniu wraca do wytwornicy. Obieg ten jest nazwany obiegiem wtórnym.

Typowy schemat ideowy układu EJ zawiera złożony jest z dwóch obiegów zamkniętych: pierwotnego i wtórnego. Oprócz występowania dwóch obiegów zamkniętych: pierwotnego i wtórnego, istnieją również układy elektrowni jądrowych np. z reaktorami prędkimi, w których oprócz pierwotnego i wtórnego występuje również obieg pośredni. W przypadku, gdy chłodziwo jest jednocześnie czynnikiem roboczym układ taki ulega uproszczeniu. Mamy wówczas do czynienia z jednym obiegiem (reaktory wrzące).

Reaktory jądrowe można klasyfikować stosując różne kryteria, jak: przeznaczenia reaktorów, energia neutronów powodujących rozszczepienie, konstrukcja rdzenia i elementów paliwowych, rodzaj moderatora i chłodziwa, stosunek ilości wytwarzanych materiałów rozszczepialnych do ilości materiałów rozszczepialnych zużywanych w czasie pracy, konstrukcja reaktora itd.

Ze względu na przeznaczenie reaktory można podzielić na:

- energetyczne, przeznaczone do produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych,
- badawcze, przeznaczone do prowadzenia w nich prac badawczych (głównie badań fizycznych oraz badań materiałów i paliwa dla reaktorów energetycznych),
- szkoleniowe (z reguły małej mocy),
- wytwórcze, przeznaczone do produkcji plutonu (zwykle są to reaktory wojskowe)
- napędowe, przeznaczone do napędów statków, lodołamaczy, okrętów podwodnych,
- ciepłownicze, przeznaczone do wytwarzania ciepła do celów ogrzewczych,
- wysokotemperaturowe, wytwarzające ciepło do celów technologicznych,
- do celów specjalnych (produkcja radioizotopów, odsalanie wody morskiej).

Ze względu na energię dominującej grupy neutronów powodujących rozszczepienia reaktory dzieli się na:

- termiczne,
- prężne,
- pośrednie (epitermiczne).

Ze względu na budowę rdzenia można rozróżnić reaktory niejednorodne (heterogeniczne), w których paliwo jest oddzielone od moderatora i ma postać elementów paliwowych, zwykle cylindrycznych lub płytkowych, zanurzonych w chłodziwie (moderatorze); oraz jednorodne (homogeniczne); w których paliwo jądrowe i moderator (chłodziwo) stanowią jednorodną mieszaninę.

Ze względu na rodzaj moderatora i chłodziwa rozróżnia się reaktory: wodne, grafitowo-gazowe, ciężkowodne, sodowe, organiczne. Zaś z uwagi na sposób przemiany paliwa rozróżnia się reaktory przetwórcze oraz powielające.

Ze względu na konstrukcję wyróżnia się reaktory zbiornikowe i kanałowe. W reaktorze zbiornikowym rdzeń jest zamknięty w grubościennym zbiorniku stalowym, przystosowanym do ciśnienia roboczego ok. 15 MPa (jak np. w reaktorach PWR). W reaktorach kanałowych pod wysokim ciśnieniem znajdują się jedynie kanały o niewielkiej średnicy, zawierające pojedyncze zespoły paliwowe.

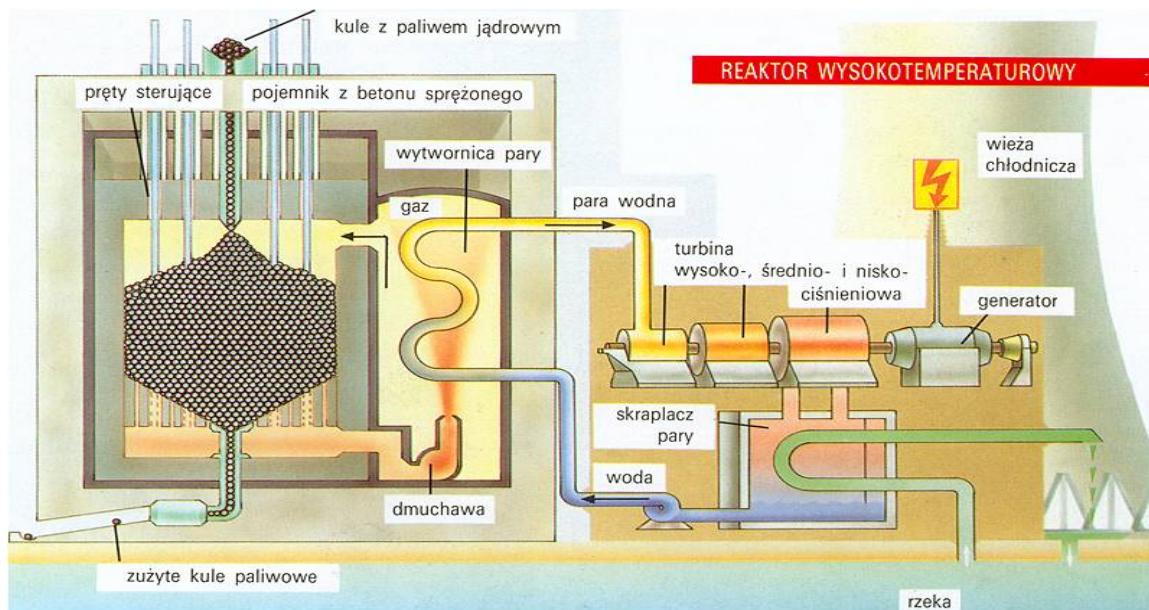
W literaturze przyjęło się oznaczanie typów reaktorów jądrowych za pomocą skrótów literowych wyrazów oznaczających w języku angielskim istotne cechy reaktorów, jak: rodzaj chłodziwa i rodzaj spowalniacza.

Do reaktorów wykorzystujących torowy cykl paliwowy zalicza się reaktory: prężnie powielające oraz wysokotemperaturowe.

Jądrowy reaktor HTGR jako przykład reaktora wykorzystującego paliwo torowe.



Rys 16. Widok zew. reaktora wysokotemperaturowego [30].



Rys 17. Schemat reaktora wysokotemperaturowego [12].

Mianem reaktorów wysokotemperaturowych HTGR określa się reaktory chłodzone gazem z moderatorem grafitowym, osiągające temperatury gazu na wyjściu z rdzenia powyżej 700°C. Stanowią one rozwinięcie reaktorów AGR w sensie znacznego podwyższenia temperatury chłodziwa na wylocie z reaktora. Pozwala to, na uzyskiwanie wysokich wartości

parametrów pary na wylocie do turbiny, a w konsekwencji zastosowanie turbin na parę przegrzaną tak, jak w elektrowniach konwencjonalnych. Paliwem w reaktorach HTGR jest wysoko wzbogacony uran (o wzbogaceniu sięgającym 93%), w postaci węgliku uranu UC_2 , który tworzy mieszaninę z węglikiem toru ThC_2 . Moderatorem jest grafit, a chłodziwem hel, który jest gazem obojętnym i ma dobre właściwości odprowadzania ciepła. Zastosowane w reaktorze HTGR materiały (UC_2 , C, He) umożliwiają dobre wykorzystanie paliwa (duże wypalenie, powielanie) i uzyskanie wysokich temperatur chłodziwa.

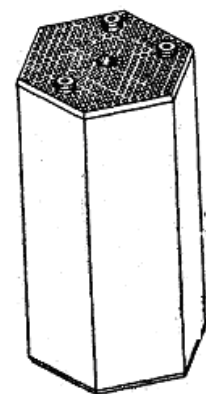
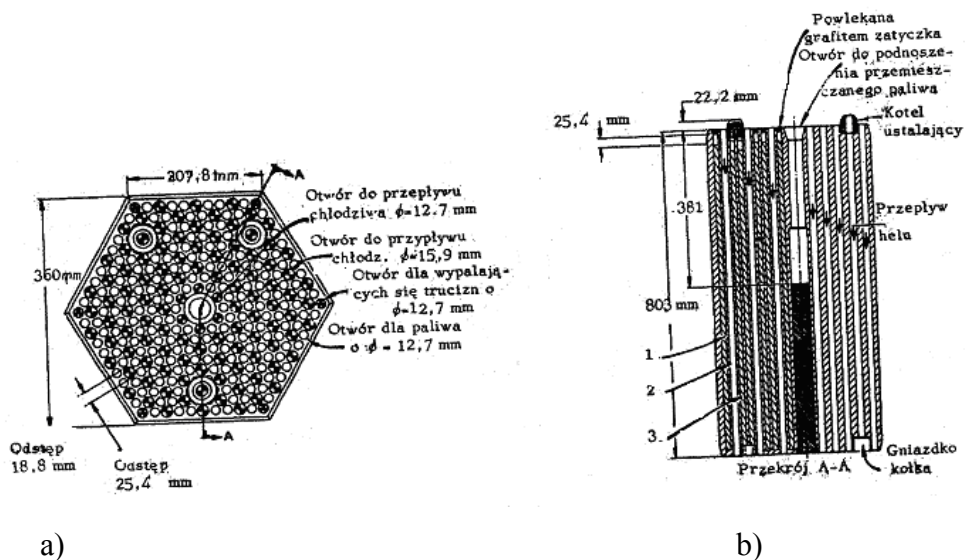
Typowy rdzeń reaktora HTGR składa się z sześciokątnych bloków grafitowych, zestawianych w szczelnie przylegające pionowe kolumny. Wewnątrz bloku są odstępy zarówno między prętami paliwowymi umieszczonymi wewnątrz kanałów jak i między kanałami z chłodziwem. Paliwo składa się z dwóch różnych typów małych powleczonych grafitem kulek. Kulki jednego typu zawierają materiał paliworodny, a drugiego-materiał rozszczepialny. Dwa typy kulek pozwalają na łatwe oddzielenie materiałów podczas procesu przerobu.



Rys18. Kulki grafitowe zawierające w sobie

zasklepione paliwo [31].

Typowa kulka materiału paliworodnego ma wewnętrzne jądro zawierające węglik toru i węglik recykliczowanego uranu. Jądro to o średnicy 350 μ otoczone jest wielowarstwowym nieprzepuszczalnym garfitem, którego warstwa ma grubość 130 μ . Kulki rozszczepialne zawierają węglik uranu całkowicie wzbogacony ^{235}U . Mają one jądra o średnicy około 150 μ i warstwę otaczającą o grubości około 150 μ . Oba typy kulek związane są węglem o niskim ciężarze właściwym jako węgliki pakowane szczelnie do krótkich prętów paliwowych o średnicy 12,7 mm i długości 50,8 mm. Pręty układane są podłużnie w kanałach paliwowych, w sześciokątne bloki, celem uzyskania żądanej wysokości kolumny paliwowej. Dzięki różnym rozmiarom, dwa typy kulek paliwowych mogą być łatwo rozdzielane. Każdy typ może być użyty w wielu różnych cyklach paliwowych.



c)

Rys 19. Typowy element paliwowy reaktora wysokotemperaturowego chłodzonego gazem. 1-pręt z wypalającą się trucizną, 2 – kanał dla chłodziwa, 3 – złożone paliwo o długości 749 mm (jednostki na rysunku podane są w mm) [26].

Obecnie rozwija się wiele metod wytwarzania kulek paliwowych. Ogólnie wymagają one technik z zakresu metalurgii proszków albo chemicznych. Metody chemiczne opierają się przeważnie na procesie son-gel, w toku którego początkowo produkowane są kulki tlenku, a następnie ulegają one przemianom na węgiel przez spiekanie w wysokiej temperaturze w złożu grafitowym. Osłonki pirolityczne są osadzane albo z metanu, albo z acetyleny w złożu sfluizydowanym.

Metody przerobu wypalonego paliwa torowego są w zasadzie podobne do tych metod, które stosowane są przy innych rodzajach paliwa. Celem przerobu jest odzyskanie z bloków grafitowych nienaruszonych kulek paliwa i rozdzielanie dwóch typów stosowanych kulek. Materiały radioaktywne są dekontaminowane, a następnie rozdzielane za pomocą ekstrakcji

rozpuszczalnikami przy zastosowaniu kwaśnej metody Thorex, która w zasadzie podobna jest do metody Phurex.

Wady i zalety reaktora wysokotemperaturowego

Wadą reaktora wysokotemperaturowego jest konieczność stosowania dużych powierzchni wymiany ciepła oraz dużych mocy niezbędnych do przetłaczania gazu przez rdzeń.

Zalety reaktora wysokotemperaturowego:

- korzystna gospodarka paliwowa, na którą zasadniczy wpływ ma wysoki stopień wypalenia oraz możliwość stosowania różnego rodzaju paliwa o różnym stopniu wzbogacenia
- wysoka temperatura chłodziwa ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$)
- mała aktywność czynnika chłodzącego (helu)
- możliwość zastosowania typowych turbozespołów na parę przegrzaną
- wysoka sprawność
- wysoki stopień bezpieczeństwa jądrowego wynikający przede wszystkim z dużej pojemności cieplnej rdzenia, małej możliwości ucieczki produktów rozszczepienia z paliwa oraz rosnącej wytrzymałości mechanicznej grafitu wraz ze wzrostem temperatury
- duży ujemny temperaturowy współczynnik reaktywności
- niski stopień narażenia radiacyjnego
- małe zapotrzebowanie na wodę
- korzystne właściwości eksploatacyjne (możliwość wymiany rdzenia i wytwornic pary, zdolność nadążania za zmianami obciążenia).

Jednak do najważniejszych zalet tego typu reaktora zalicza się bardzo korzystne charakterystyki dotyczące bezpieczeństwa.

Biorąc pod uwagę fakt, że reaktory jądrowe o dobrej technologii i ekonomiczności już istnieją, wprowadzanie nowych typów reaktorów może być uzasadnione tylko z poniższych przyczyn:

- bardziej efektywna przeróbka tanich zapasów paliwa jądrowego
- redukcja kosztów energii
- specjalne cechy poprawiające możliwość wykorzystania reaktorów w nieelektrycznych sektorach rynku energetycznego.

Przeróbka toru w reaktorach przyczynia się do wszystkich w/w celów [9, 19, 26,28,29].

5. Bezpieczeństwo radiologiczne torowego cyklu paliwowego

Źródłem promieniotwórczym w pierwszym stadium cyklu są naturalne radionuklidy, przy wydobyciu i przeróbce rudy, produkcji paliwa radionuklidy wraz z odpadami gazowymi i ciekłymi mogą być uwalniane do otoczenia. Zasadnicza masa odpadów promieniotwórczych powstaje przy przeróbce rudy. Są one zbierane w specjalnych przechowalniach. W rezultacie erozji wiatrowej lub wodnej, uwalniania radonu przechowalnia w ciągu długiego okresu może być źródłem zanieczyszczenia radiologicznego biosfery. W odpadach torowych najbardziej trwałą radionuklid ^{228}Ra ma okres półrozpadu $T_{1/2} = 5,8$ lat, jest to wartość znacznie niższa niż dla nuklidów promieniotwórczych z szeregu torowego. Z tej przyczyny aktywność odpadów torowych opada znacznie szybciej niż aktywność odpadów uranowych. Największy udział w napromieniowaniu ludności ma radon i produkty jego rozpadu. Krytyczny sposób oddziaływania tych radionuklidów stanowi wdychanie i spożywanie wraz z pokarmem. Istnieje duża różnica w okresie półrozpadu izotopów radonu, powstających w szeregu torowym a uranowym. To znacznie upraszcza środki ochrony przed uwalnianiem z odpadów torowych i innych odpadów stałych JCP (toru). W szeregu torowym kolejnym po radonie, ze względu na istotność biologiczną, jest ^{228}Ra (w szeregu torowym- ^{230}Th i w mniejszym stopniu ^{226}Ra) Udział pozostałych radionuklidów jest nieznaczny. Przy wydobyciu i przerobie rudy, wycieki substancji promieniotwórczych do otaczającego środowiska wraz z odpadami ciekłymi, w zasadzie, można zaniedbać w porównaniu z uwolnieniami gazo-aerozolowymi.

Ruda	H _e , mrem/a		S _e , osobo - rem /(MWe*a)	
	personel	ludność	personel	ludność
Torowa	-	8 ^x	-	0,001 –0,01 ^{xx}
Uranowa	400-1500	90 ^{xx}	0,1	0,05

x-maksymalna dawka indywidualna.

*xx - nieokreśloność 0 rozrzuć0 wartości wynika przede wszystkim z różnego zużycia toru na 1Mwe*a w różnych cyklach paliwowych.*

Tabela 5. Przedstawia dawki napromieniowania personelu i ludności, związanego z pracą obiektów wydobycia i przerobu rudy [27].

Większość związków uranu lub toru to substancje małe. W razie ich trafienia w postaci aerozoli do filtrów powietrza są łatwo wychwytywane przez współczesne urządzenia odpylające. W rezultacie uwolnienia radioaktywności i związane z nimi dawki napromieniowania ludzkości w pobliżu obiektów tych etapów JCP są bardzo małe.

Jednak należy zauważyć specyficzny problem cyklu z wykorzystaniem toru, związany z występowaniem w paliwie wypalonym regenerowanym ^{232}U i produkty jego rozpadu. Warunkują one wysoką aktywność promieniotwórczą γ tego paliwa, wymagających specjalnych środków ochrony radiologicznej personelu podczas wytwarzania paliwa. Moc dawki ekspozycyjnej w odległości 1m od 1g ^{233}U , wyładowanego z płaszcza reaktora prędkiego, może osiągnąć 1,6 mR/h (maksimum osiąga po upływie kilku lat). Dla paliwa z reaktorów jest ona wielokrotnie wyższa. Takie poziomy promieniowania gamma wymagają specjalnych środków ochrony personelu podczas wytwarzania, przechowywania i transportu paliwa.

Główna masa substancji promieniotwórczych jest zawarta w paliwie. Odpady promieniotwórcze elektrowni jądrowych powstają w wyniku niewielkich przecieków substancji promieniotwórczych z paliwa do chłodziwa i aktywacji tego chłodziwa oraz jego domieszek. Powstające odpady w elektrowni są poddawane obróbce różnego rodzaju (filtracja, czasowe oczekiwanie itp.) W rezultacie przeróbki następuje głębokie czyszczenie tych odpadów z substancji promieniotwórczych. Dawki napromieniowania ludności w zależności od rodzaju paliwa (uran, uran – tor) niewiele się różnią jak również nieistotne mogą być różnice dawek napromieniowania personelu.

Dawki napromieniowania dla reaktorów wykorzystujących torowy cykl paliwowy są znacznie niższe w porównaniu z innymi.

Najważniejszymi radiounuklidami w torowym cyklu paliwowym, odpowiedzialnymi za wielkość dawki napromieniowania ludności, są nuklidy: ^{85}Kr , ^{12}C i ^{129}J . Dzięki swoim własnościom (fizyko – chemicznymi, głównie względnie wysokim wartościom $T_{1/2}$ są one zdolne rozprzestrzeniać się na odległości globalnej skali (po wyżej 1000km od miejsca wycieku do otaczającego środowiska).

Nuklid promieniotwórczy	Aktywność wycieków, Ci/a	H_E^{MAX} , mrem.a
^{14}C	$3.2 \cdot 10^3$	0,16
^{85}Kr	$2 \cdot 10^7$	0,4
3H	$6 \cdot 10^5$	5
$^{129}J^x$	0,8 (80)	0,07 (7)
^{238}Pu	0,03	0,06
^{239}Pu	0,002	0,007
^{90}Sr	-	-
$^{134,137}Cs$	-	-

x - wycieki ^{129}J odpowiadają współczynnikowi wychwytywania 100; w nawiasach podano wycieki ^{129}J dla przypadku bez wychwytywania.

Tabela 6. Uwolnienia promieniotwórcze i dawki napromieniowania ludzkości, pochodzące z zakładu radiochemicznego, przetwarzającego paliwo z reaktorów wysokotemperaturowych [27].

Do uwolnień promieniotwórczych i dawek napromieniowania mogą również wnieść pewien wkład inne radionuklidy (produkty rozszczepienia i aktywacji, pierwiastki transplutonowe) występujące w paliwie wypalonym. Wartość H_E^{MAX} jest rzędu 10 mrem/rok i niewiele się zmienia w zależności od cyklu. Ze wzrostem odległości r od zakładu radiochemicznego wartość H_E^{MAX} dostatecznie szybko maleje.

Pewna część substancji promieniotwórczych może przedostać się do otoczenia wraz z odpadami ciekłymi. Dawki napromieniowania ludności w efekcie takich uwolnień w większym stopniu zależą od warunków miejscowych niż wartości H_E od uwolnień promieniotwórczych. Dawki te silnie zależą od własności miejscowego ujęcia wody. Dawki indywidualne i kolektywne promieniowania pochodzące od ciekłych uwolnień będą w zasadzie, mniejsze lub tego samego rzędu, jak dawki promieniowania pochodzące od wycieków gazo-aerozolowych. Oddziaływanie globalne zakładu radiochemicznego jest określone przez tzw. globalnie istotne radionuklidy. Należą do nich: 3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{129}J .

Wartości wielkości $\dot{H}$ i S^c oblicza się z następujących zależności:

$$\dot{H}(t) = KPD \cdot x(t), \quad (1)$$

$$S_d^c = S^c(\varepsilon) = KPD \cdot \int_0^{\infty} N(t) \cdot x(t) e^{-\alpha t} dt \quad (2)$$

Gdzie:

KPD – współczynnik przekształcania dawki,

$X(t)$ – koncentracja radionuklidu w rozpatrywanej części biosfery (atmosferze lub biosferze) w chwili t ,

ε – norma dyskontowana,

$N(t)$ – ludność kuli ziemskiej lub półkuli północnej (południowej) w chwili t .

Przyrost liczby ludności $N(t)$ opisuje się zwykle krzywą logistyczną postaci:

$$N(t) = N_0 / (1 + b \cdot e^{-ct}) \quad (3)$$

Gdzie współczynniki N_0 , b , c – są określone w oparciu o prognozy przyrostu liczby ludności.

Wartość $x(t)$ oblicza się wykorzystując modele komorowe. Związek między wielkościami S^c i $x(t)$ ma postać przekształcenia Laplace'a.

Radionuklidy	S^c_d , osoborem/ (Mwe · a)
^{14}C	0,5
$^{85}\text{Kr}^3\text{H}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
^{85}Kr	0,25
^{129}J	$4 \cdot 10^{-3}$

Tabela 7. Oczekiwane dawki S^c_d napromieniowania ludności, wywołane globalnym zanieczyszczeniem radiologicznym biosfery przez obiekty JCP z reaktorami HTGR [27].

Dla obliczania stopnia niebezpieczeństwa odpadów promieniotwórczych stosuje się tzw. wskaźnik niebezpieczeństwa (ryzyka) H . Dla konkretnego i -tego izotopu określa się go jako $H_i = M_i \cdot T_i$, $T_i = Q_i / \text{GDK}_i$, gdzie: M_i - współczynnik, charakteryzujący jego ruchliwość, T_i - objętość wody, niezbędna do rozcieńczenia odpadów z i – tym radionuklidem do GDK, m^3 , Q_i – aktywność i – tego nuklidu w odpadach, GDK_i – graniczna dopuszczalna koncentracja nuklidu promieniotwórczego w wodzie.

Zamknięcie cyklu paliwowego (recykliczacja odzyskiwanego ^{233}U lub ^{235}U , ^{239}Pu) prowadzi do wzrostu udziału aktynowców w odpadach o rząd wielkości, zarówno dla cyklu torowego jak i uranowo – plutonowego.

Wnioski dotyczące torowego cyklu paliwowego od strony bezpieczeństwa radiologicznego.

Stosowanie toru w cyklu paliwowym prowadzi do ograniczenia oddziaływania radiologicznego obiektów początkowego stadium jądrowego cyklu paliwowego i elektrowni jądrowych. W pozostałych stadiach cyklu oddziaływanie jest takie same, z wyjątkiem zakładu radiochemicznego dla paliwa w reaktorach typu HTGR – wynika ono z własności reaktora, a nie z zastosowanego paliwa.

Potencjalne zagrożenie radiologiczne odpadami promieniotwórczymi jądrowego cyklu paliwowego nie jest wyższe przy paliwie torowym niż uranowym. Jak również nie stwarza nowych problemów w zakresie zapewnienia bezpieczeństwa w warunkach awaryjnych reaktorów. Nie zmienia ono też cech bezpieczeństwa radiologicznego ludności i personelu.

Twarde promieniowanie gamma, charakterystyczne dla produktów rozpadu ^{233}U , wymaga dodatkowych środków ochrony personelu na etapie wytwarzania paliwa i częściowo na pozostałych stadiach cyklu. Środki te obejmują automatyzację wytwarzania, zdalne sterowanie itp. Dawki napromienienia personelu będą w istotny sposób zależeć od tych środków, a także od strategii postępowania z wypalonym i przerobionym paliwem jądrowym [27].

6. Tor na tle innych izotopów promieniotwórczych w pożywieniu

Do najważniejszych naturalnych izotopów promieniotwórczych w pożywieniu człowieka zalicza się: uran, tor, rad, ołów – 210 i polon – 210.

Badania Fisenne i in. (1987r.) oraz Sunta i in. (1987r.) wskazują, że tor do organizmu człowieka dostaje się głównie z pożywieniem, Z wdychanym powietrzem wnika od ok. 0,2% do 0,8% całego dziennego wchłonięcia. Z przewodu pokarmowego do płynów ustrojowych przechodzi ok. 0,5% w zakresie od 0,1 do 1%. ^{232}Th kumuluje się przede wszystkim w kościach (około 60%) w płucach (20%), w gruczołach limfatycznych (6%) i w tkankach miękkich (śledziona, wątroba, nerki) 13%.

Istnieją następujące zależności między zawartością toru w kościach i dziennym wchłonięciem. Zawartość w kościach = $4000 f, x / [\text{mBq}]$, gdzie f - współczynnik przechodzenia z przewodu pokarmowego do krwi, I - dzienne wchłonięcie toru w mBq.

Artykuł	Wałbrzych		Polska Centralna		Wałbrzych	Polska
	^{238}U	^{234}U	^{238}U	^{234}U	^{226}Ra	^{226}Ra
Artykuły pochodzenia zwierzęcego						
Mleko	2,56 ±0,27	3,69 ±0,34	3,04 ±0,78	3,85 ±0,78	9,95 ±0,90	12,6 ±0,37
Mięso wołowe	5,63 ±1,29	6,99 ±1,50	3,75 ±0,61	4,07 ±0,74	11,8 ±1,39	19,6 ±1,90
Mięso wieprzowe	1,62 ±0,46	1,31 ±0,41	2,26 ±0,47	2,33 ±0,72	11,6 ±1,36	9,83 ±0,30
Mięso drobiowe	1,74 ±0,28	1,82 ±0,29	2,62 ±0,22	3,21 ±0,08	8,52 ±1,46	7,07 ±0,30
Jaja	1,78 ±0,27	1,33 ±0,23	1,63 ±0,01	1,35 ±0,04	188 ±6,10	99,6 ±5,13
Śledzie	-		11,5 ±0,88	12,7 ±0,81	-	24,3 ±2,50
Dorsze	-		6,99 ±0,13	7,58 ±0,72		22,4 ±1,10
Artykuły pochodzenia roślinnego						
Mąka	4,72 ±0,38	5,28 ±0,42	2,49 ±0,03	2,67 ±0,17	43,5 ±2,90	48,4 ±3,67
Ziemniaki	6,90 ±0,76	8,80 ±0,90	4,72 ±0,68	4,81 ±0,36	13,7 ±1,50	19,2 ±0,09
Marchew	7,72 ±0,87	9,33 ±1,08	1,26 ±0,11	1,91 ±0,48	154 ±10,0	59,4 ±0,36
Buraki czerwone	3,33 ±0,47	4,38 ±0,35	2,98 ±0,28	3,95 ±1,33	59,0 ±3,8	41,9 ±2,21
Pietruszka	13,6 ±2,10	18,6 ±2,60	4,33 ±0,34	5,35 ±0,16	215 ±13	137 ±1,85
Cebula	2,59 ±0,40	3,72 ±0,49	3,12 ±0,02	2,91 ±0,23	-	9,82 ±0,47
Fasolka	3,28 ±0,94	4,48 ±0,44	5,20 ±0,43	5,77 ±0,42	179 ±14	48,5 ±2,50
Salata	15,4 ±1,70	17,2 ±1,80	11,2 ±1,17	11,8 ±2,85	59,7 ±6,10	34,2 ±2,06
Ogórki	2,17 ±0,57	2,24 ±0,76	1,43 ±0,11	1,43 ±0,06	11,5 ±1,10	8,66 ±0,29
Pomidory	0,92 ±0,25	1,36 ±0,11	0,51 ±0,14	0,77 ±0,27	3,99 ±0,54	8,76 ±0,49
Jabłka	1,48 ±0,35	1,54 ±0,13	1,32 ±0,18	1,52 ±0,04	14,7 ±1,00	11,6 ±0,13
Wiśnie	3,08 ±0,36	3,91 ±0,42	2,01 ±0,07	2,04 ±0,15	18,0 ±2,40	15,2 ±0,23
Porzeczki	10,0 ±1,80	9,37 ±0,98	4,15 ±0,95	4,42 ±1,27	19,6 ±1,10	27,9 ±8,81
Woda	7,29 ±0,44	15,0 ±0,90	8,32 ±2,13	10,2 ±2,12	1,70 ±0,15	0,97 ±0,20

Tabela 8. Stężenie ^{238}U , ^{234}U i ^{226}Ra w w artykułach żywnościowych i w wodzie w rejonie Wałbrzycha i w Polsce Centralnej, mBq kg⁻¹ lub mBq l⁻¹ [32].

Artykuł	Wałbrzych			Polska Centralna		
	²³² Th	²³⁰ Th	²²⁶ Th	²³² Th	²³⁰ Th	²²⁶ Th
Artykuły pochodzenia zwierzęcego						
Mleko	1,19 ±0,23	1,15 ±0,22	2,64 ±0,36	0,61 ±0,05	0,76±0,36	1,39 ±0,35
Mięso wołowe	3,61 ±0,40	3,04 ±0,36	4,90 ±0,48	2,40 ±0,20	2,90±0,25	6,33 ±1,50
Mięso wieprzowe	0,52 ±0,19	0,73 ±0,26	2,39 ±0,44	1,82±0,14	2,68±0,25	5,66 ±0,71
Mięso drobiowe	1,65 ±0,60	2,06 ±0,68	2,48 ±0,76	1,31 ±0,33	1,95±0,70	3,80 ±0,04
Jaja	2,47 ±0,30	1,56 ±0,57	22,5 ±3,0	1,52±0,25	1,46±0,15	20,1 ±0,95
Śledzie	-	-	-	0,81 ±0,23	1,30±0,45	6,82 ±1,89
Dorsze	-	-	-	0,78 ±0,58	2,03±0,49	4,75 ±1,69
Artykuły pochodzenia roślinnego						
Mąka	2,03 ±0,40	1,36 ±0,34	13,4 ±1,40	2,13 ±0,23	1,53±0,16	19,2 ±0,54
Ziemniaki	2,14 ±0,46	3,22 ±0,58	3,52 ±0,61	1,86 ±0,06	3,25±0,91	6,84 ±0,19
Marchew	2,92 ±0,46	3,43 ±0,62	25,2 ±3,00	0,67±0,14	0,73±0,06	13,7 ±0,58
Buraki czerwone	4,47 ±0,74	7,65 ±0,56	16,3 ±2,51	1,04 ±0,12	1Th,24±0,04	8,90 ±0,58
Pietruszka	7,11 ±0,91	8,99 ±0,95	48,9 ±4,30	1,53±0,29	1,21±0,07	33,4 ±2,90
Cebula	1,09 ±0,28	1,29 ±0,31	9,52 ±0,98	0,91 ±0,14	1,72±0,14	4,94 ±0,30
Fasolka	2,58 ±0,55	3,41 ±0,52	10,2±1,4	2,16 ±0,78	4,14±0,74	3,44 ±0,07
Salata	4,19 ±0,89	6,28 ±1,08	7,34 ±1,18	5,85 ±0,11	6,77±0,24	9,35 ±1,80
Ogórki	1,10 ±0,25	1,75 ±0,61	3,21 ±0,81	0,75 ±0,10	1,26±0,09	2,32 ±0,12
Pomidory	1,15 ±0,11	0,74 ±0,17	1,26 ±0,27	0,31 ±0,01	0,23±0,05	1,94 ±0,03
Jabłka	0,68 ±0,28	0,91 ±0,12	3,78 ±0,69	0,54 ±0,0	0,73±0,06	4,17 ±0,18
Wiśnie	1,62 ±0,21	1,58 ±0,20	4,22 ±0,36	0,47±0,11	0,72±0,03	3,34 ±0,03
Porzeczki	5,53 ±1,05	7,49 ±0,08	11,8 ±0,45	2,59 ±0,64	2,76±1,00	7,89 ±1,71
Woda	0,06±0,02	1,43±0,01	0,09±0,03	0,02±0,01	0,06±0,03	0,06±0,01

Tabela 9. Stężenie ²³²Th, ²³⁰Th, ²³²Th i ²²⁸Th w artykułach żywnościowych i wodzie w rejonie Wałbrzycha i w Polsce Centralnej, mBq kg⁻¹ lub mBq l⁻¹ [32].

W większości artykułów pochodzenia roślinnego stężenia ²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra oraz Th jest większe w rejonie Wałbrzycha niż w Polsce Centralnej. Może to być związane z wyższym stężeniem radionuklidów w glebie w rejonie Wałbrzycha. Średnie stężenie ²²⁶Ra w glebie w rejonie Wałbrzycha mieści się w granicach, od 20 do 60 Bq/kg, podczas gdy w Polsce Centralnej wynosi ono mniej niż 20 Bq/kg. Średnie stężenie ²²⁹Ac (izotopu szeregu torowego) w glebie w rejonie Wałbrzycha zawiera się w granicach od 15 do 45 Bq/kg, natomiast w Polsce Centralnej jest niższe od 15 Bq/kg.

Do oceny wielkości wchłonięć z pożywieniem izotopów promieniotwórczych stosuje się zazwyczaj dwie metody. W pierwszej z nich wykorzystuje się dane o stężeniu radionuklidów w artykułach żywnościowych i w wodzie oraz dane statystyczne o wielkości spożycia tych artykułów; w drugiej metodzie wykonywane są oznaczenia izotopów w próbkach całodziennego pożywienia. Pierwsza z tych metod umożliwia określenie udziału poszczególnych artykułów żywnościowych jako źródła radionuklidu w pożywieniu. W metodzie opartej na analizach całodziennego pożywienia ważne jest, aby próbki były reprezentatywne dla określonych grup ludności. Roczne i dzienne wchłonięcia przedstawione w tej pracy pochodzą z badań wykorzystujących obie metody.

Wchłonięcie	^{238}U	^{234}U	^{232}Th	^{230}Th	^{228}Th	^{226}Ra
Wałbrzych						
Dzienne (mBq d ⁻¹)	17,7 ±0,61	30,2 ±1,40	3,38 ±0,29	11,8 ±1,21	11,8 ±1,21	56,6 ±6,2
Roczne (Bq a ⁻¹)	6,45 ±0,30	11,0 ±0,51	1,24 ±0,11	2,14 ±0,14	4,32 ±0,45	20,7 ±2,27
Polska Centralna						
Dzienne (mBq d ⁻¹)	17,5 ±1,82	20,7 ±3,10	2,3B ±0,48	4,30 ±0,76	11,6 ±1,27	45,6 ±2,06
Roczne (Bq a ⁻¹)	6,40 ±0,66	7,56 ±1,13	1,03 ±0,18	1,57 ±0,28	4,23 ±0,47	16,6 ±0,75
Warszawa^a						
Dzienne (mBq d ⁻¹)	15,1 ±2,67	17,9 ±2,89	2,74 ±0,73	4,15 ±1,58	17,0 ±2,62	50,4 ±6,11
Dzienne (mBq a ⁻¹)	5,50 ±0,97	6,54 ±1,06	1,00 ±0,27	1,52 ±0,58	6,21 ±0,96	18,4 ±2,23

^a Określone na podstawie analizy sześciu próbek całodziennego pożywienia.

Tabela 10. Średnie dzienne i roczne wchłonięcia uranu i toru oraz ^{226}Ra u dorosłych mieszkańców rejonu Wałbrzycha i Polski Centralnej [32].

W tabeli 3 przedstawiono średnie roczne i dzienne wchłonięcia ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th i ^{226}Ra w rejonie Wałbrzycha i w Polsce Centralnej, obliczone na podstawie stężeń tych izotopów w artykułach żywnościowych i danych o wielkości ich spożycia oraz wchłonięć określonych na podstawie analiz całodziennego pożywienia pobieranego z gospodarstw domowych w Warszawie. Roczne i dzienne wchłonięcia ^{238}U i ^{228}Th w obu badanych rejonach praktycznie nie różniły się, natomiast w Polsce Centralnej niższe niż w rejonie Wałbrzycha były wchłonięcia ^{234}U , ^{228}Th (około 30%), i ^{232}Th oraz ^{226}Ra (około 20%).

Pobieranie radionuklidów z pożywieniem w rejonie Wałbrzycha oceniane było w 1992 roku, podczas gdy w Polsce Centralnej - w 1995 roku. Różnice w wielkości wchłonięć wynikają zarówno z różnych stężeń radionuklidów w artykułach żywnościowych, jak też z innej struktury ich spożycia w kolejnych latach. Wchłonięcia określone na podstawie analizy całodziennego pożywienia w Warszawie są bliskie wartościom określonym z artykułów żywnościowych dla Polski Centralnej.

W tabeli 11 przedstawiono udział poszczególnych grup artykułów żywnościowych w dziennej podaży izotopów uranu i toru oraz ^{226}Ra . Zarówno w próbkach pobieranych z rejonu Wałbrzycha, jak i z Polski Centralnej głównym źródłem izotopów uranu była woda, a następnie ziemniaki i artykuły pochodzenia zwierzęcego. W przypadku ^{232}Th podobny udział w podaży miały artykuły pochodzenia zwierzęcego, warzywa i ziemniaki, a najmniejszy udział - woda. ^{228}Th wprowadzany był głównie z warzywami, produktami zbożowymi i artykułami pochodzenia zwierzęcego, natomiast głównym źródłem ^{230}Th w rejonie Wałbrzycha była woda, a następnie ziemniaki i warzywa oraz artykuły pochodzenia zwierzęcego, podczas gdy w Polsce Centralnej głównym źródłem ^{230}Th były warzywa, ziemniaki i artykuły pochodzenia zwierzęcego.

Artykuły	^{238}U	^{234}U	^{232}Th	^{230}Th	^{228}Th	^{226}Ra
Wałbrzych						
Pochodzenia zwierzęcego	11,3	8,9	29,8	16,6	22,8	23,0
Zbożowe	5,7	3,7	12,8	5,0	24,2	16,4
Ziemniaki	15,4	11,6	25,0	21,7	11,7	L_9.5
Warzywa	9,4	6,8	25,4	19,8	36,4	44,7
Owoce	1,7	1,0	4,6	3,5	3,9	2,3
Woda	56,5	68,1	2,4	33,4	1,0	4,1
Polska Centralna						
Pochodzenia zwierzęcego	13,1	13,6	25,8	22,1	20,3	26,8
Zbożowe	3,5	2,9	15,1	8,1	31,2	24,8
Ziemniaki	10,6	9,2	25,9	29,8	23,3	16,6
Warzywa	6,2	5,8	26,9	34,4	19,8	24,0
Owoce	1,6	1,4	5,3	3,7	4,7	4,9
Woda	65,0	67,1	1,0	1,9	0,7	2,9

Tabela 11. Udział podstawowych grup artykułów żywnościowych i wody w rocznym wchłonięciu izotopów uranu i toru oraz ^{226}Ra (%) [32].

Roczne wchłonięcia w Polsce wynoszą dla ^{238}U , ^{234}U - $6,12 \pm 0,53$ Bq i $8,37 \pm 2,34$ Bq, dla ^{232}Th , ^{230}Th i ^{228}Th odpowiednio $1,09 \pm 0,13$ Bq, $1,74 \pm 0,34$ Bq i $4,92 \pm 1,12$ Bq dla ^{226}Ra - $18,6 \pm 1,48$ Bq. Dane te wskazują, że roczne wchłonięcia omawianych izotopów w Polsce na ogół nie odbiegają od wchłonięć obserwowanych w innych krajach [32,33].

Literatura:

1. www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/90Thori
2. www.republika.pl/dydot/Th
3. www.webelements.com/webelements/elements/text/Th/key
4. www.theodoregray.com/PeriodicTable/Elements/090/index.s7
5. M. Kielbowicz. Jądrowe reaktory energetyczne. WNT 1978.-Biblioteka Nukleoniczna.
6. www.periodensystem.info/elemente/uran.
7. www.mineral.galleries.com/minerals/oxides/uraninit/uraninit.
8. www.vcs.ethz.ch/chemglobe/ptoe/_/92
9. Z.Celiński. Podstawy energetyki jądrowej. WNT 1984 –Biblioteka PW.
10. Z.Celiński. Cykl paliwowy reaktorów wodnych. WNT 1984 - Biblioteka PW.
11. Postępy Techniki Jądrowej. Nr. 3-4, 1988r. - Biblioteka PW.
12. www.atomowe.kei.pl/elektrownias
13. www.giph.com.pl/bg/1999_05/bycalboniebyc
14. www.pearl1.lanl.gov/periodic/elements/92
15. W. Dembiński. Rynek uranu i paliw reaktorowych stan i perspektywy. PTJ VOL.44 Z.2 2001. - Biblioteka PW.
16. Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i Świata. Str.845-848 i str.867-871. PAN, Instytut gospodarki surowcami mineralnymi Polski i Świata.. Kraków 2003. - Biblioteka GUS.
17. Minerals Commodity.USGS sience for a changing world. Str. 170-171. Sumeries 2001.- Biblioteka GUS.
18. www.thorium-waste.com
19. Thorium Fuel Cycle. Str. 1-6, International Atomic energy agency. Vienna 1970. – Biblioteka Nukleoniczna
20. www.world-nuclear.org/info/inf62
21. www.echelon1.mit.edu/theses/wangda
22. www.uic.com.au/nip67
23. www.thoriumpower.com
24. www.if.uj.edu.pl/Foton/64/armbruster
25. www.home.earthlink.net/%7Ebhoglund/th_NuclearFuel
26. A. Sosnowski. Biblioteka Postępów Techniki Jądrowej. 1982. - Biblioteka PW.
27. Postępy Techniki Jądrowej. R.33. 1989, nr. 10-12. Str. 547 – 566. - Biblioteka PW.

28. M. Lech. Elektrownie jądrowe. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. 1992r. - Biblioteka PW.
29. M. Lech. Kierunki rozwoju elektrowni jądrowych. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. 1997r. - Biblioteka PW.
30. www.home.t-online.de/home/PKA.DE/alu~1.htm#Unternehmen
31. www.galaxy.uci.agh.edu.pl/~filipow/Dydaktyka/fpiwe/w06.
32. Zofia Pietrzak – Flis. Naturalne izotopy promieniotwórcze w pożywieniu ludności. Str. 18 – 23. Polski. PTJ, VOL. 42 Z.2.1999r. - Biblioteka PW.
33. www.lo.wielun.ids.pl/pl/strona_promien/podstrony/zywnosc