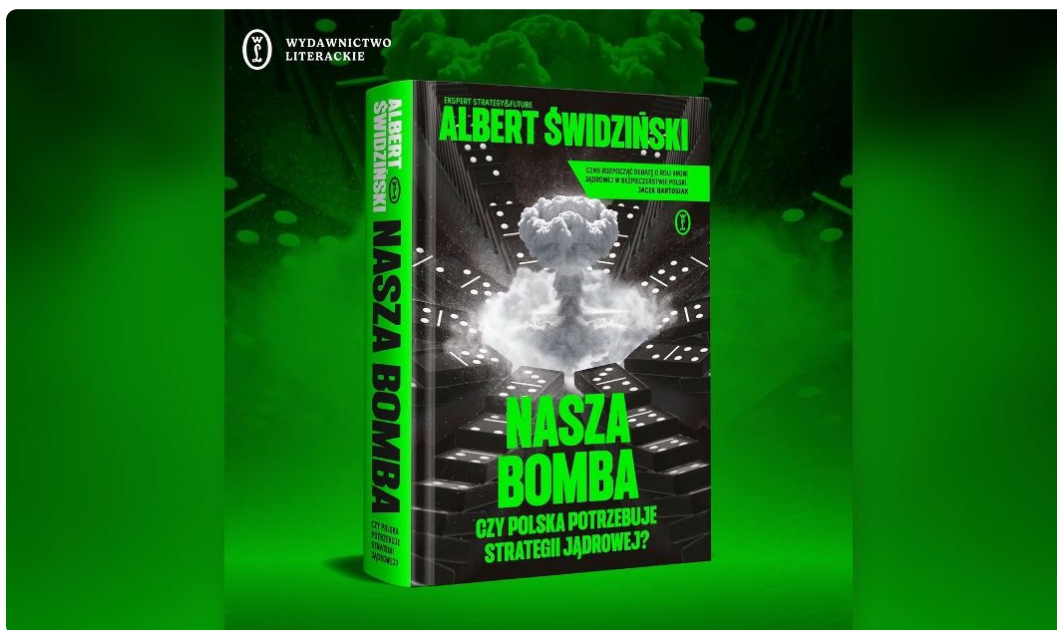


Jak się robi bombę. W jaki sposób stworzyć broń jądrową?



Tutaj powinien być materiał audio

Albert Świdziński. Jak się robi bombę (FRAGMENT KSIAŻKI)

W jaki sposób stworzyć broń jądrową?

Mechanizm działania broni jądrowej – generowania ogromnej ilości energii w bardzo krótkim czasie (miliardowe części sekundy) – opiera się, w przeciwieństwie do konwencjonalnych ładunków wybuchowych, na reakcjach fizycznych, a nie chemicznych. Należy doprowadzić do sytuacji, w której duże i ciężkie atomy (najczęściej uranu-235 lub plutonu-239, które są wykorzystywane jako materiał rozszczepialny we wszystkich używanych obecnie i w przeszłości ładunkach nuklearnych) zostają „trafione” dostarczonemu z zewnątrz neutronem. Jądra atomów – dla uproszczenia – składają się z pewnej liczby dodatnio naładowanych protonów oraz neutronów, które to nie mają ładunku; protony – pomimo tego, że cząstki o tym samym ładunku odpychają się – utrzymywane są w jądrze za pomocą oddziaływań jądrowych, w tym poprzez neutrony pełniące rolę swego „kleju”.

Gdy w jądro pierwiastka ciężkiego uderzy neutron, jądro atomu staje się niestabilne i rozpada się na mniejsze atomy. Wynikiem tego rozpadu najczęściej są również dwa lub trzy neutrony (w przypadku rozszczepienia jądra uranu-235 zakłada się, że liczba „uwolnionych” neutronów wynosi 2,45). I tak na przykład w reakcji rozszczepienia uranu-235 po trafieniu w jego jądro przez neutron na bardzo krótką chwilę powstaje

niestabilny pierwiastek, uran-236, który następnie rozpada się na dwa kolejne – krypton-92 i bar-141 – generując przy tym porcję energii. Przy okazji, co dla nas w tym momencie najważniejsze, uwalniane są wspomniane wyżej neutrony.

Spora część energii wydzielanej w reakcji jądrowej (reakcji rozszczepienia) pochodzi właśnie z energii kinetycznej powstałej w wyniku odpychania się protonów. W przeciwieństwie do reakcji chemicznych – na przykład eksplozji trotylu – które dotyczą przede wszystkim elektronów krążących „we mgle” wokół jądra atomu, reakcje jądrowe oddziałują na same jądra atomów. W rezultacie siła eksplozji bywa milion razy większa niż w przypadku reakcji chemicznych. Stąd też pojedynczy ładunek nuklearny może dokonać zniszczeń, jakie byłyby możliwe do osiągnięcia jedynie za pomocą tysięcy ładunków konwencjonalnych. Dlatego materiał potrzebny do wygenerowania gigawata energii rocznie w elektrowni jądrowej mieści się w mniej niż jednym wagonie towarowym, podczas gdy w przypadku elektrowni węglowej potrzebne jest aż osiemdziesiąt wagonów... dziennie.

W momencie, gdy dostarczony z zewnątrz neutron uderzy w podatne na rozszczepienie jądro, rozpada się ono, uwalniając przy tym nowe neutrony. Jeżeli te zdołają trafić w kolejne jądra rozszczepialne, zaczyna się proces zwany reakcją łańcuchową, który podtrzymuje się samodzielnie do momentu, gdy zużyte zostanie paliwo lub zmienią się warunki, w których przebiega reakcja, zatrzymując ją. To ostatnie jest kluczowe, bo stworzenie sytuacji w której może dojść do reakcji łańcuchowej, jest bardzo trudne. Potrzebne jest do tego osiągnięcie masy krytycznej, a więc doprowadzenie do sytuacji, w której kula zbudowana z materiału rozszczepialnego jest na tyle duża i gęsta, że wygenerowane przez rozszczepienie neutrony poruszające się wewnątrz niej „trafią” w kolejne jądro – a nie uciekną poza nią (kula jest wykorzystywana ponieważ maksymalizuje ilość materiału w stosunku do powierzchni bryły – co z kolei minimalizuje ilość uciekających poza bryłę neutronów). Do oceny tego, jaka jest masa krytyczna, przydatne jest pojęcie średniej drogi swobodnej – chodzi o to, jaką drogę musi pokonać neutron, aby prawdopodobieństwo trafienia w inne jądro było na tyle duże, by dało się myśleć o zainicjowaniu reakcji łańcuchowej. Im większa jest objętość kuli z materiału rozszczepialnego, tym dłużej neutrony w nim przebywają – i tym samym większe jest prawdopodobieństwo, że na swojej drodze napotkają jądro atomu, doprowadzając do jego rozbicia. To z kolei wygeneruje kolejne dwa lub trzy neutrony, które na swojej drodze napotkają następne jądro i tak dalej. Stąd właśnie nazwa „reakcja łańcuchowa”. W pewnym momencie, na przykład poprzez zwiększenie masy materiału rozszczepialnego lub jego gęstości możemy osiągnąć masę krytyczną i możliwe staje się zajście reakcji łańcuchowej, w drodze której ilość kolejnych rozszczepień będzie rosła w sposób niekontrolowany. Dla uranu-235 przyjmuje się, że masę krytyczną osiąga kula o wadze 52 kilogramów oraz średnicy 16,5 centymetra; dla plutonu-239 jest to odpowiednio 10 kilogramów oraz 9,9 centymetra.

Tak więc aby wygenerować przy pomocy tych zjawisk eksplozję, potrzebne jest osiągnięcie sytuacji, w której po rozbiciu pojedynczego atomu uwolnione w ten sposób neutrony doprowadzą do reakcji łańcuchowej. Jeżeli chcemy poprzez rozszczepienie jąder ciężkich generować energię elektryczną, należy upewnić się, że reakcja łańcuchowa przebiega w sposób kontrolowany, a wygenerowane w jej toku ciepło jest przekształcane w energię elektryczną. Jeżeli natomiast chcemy doprowadzić do eksplozji, musimy upewnić się, że reakcja przebiega tak gwałtownie i szybko, jak to możliwe.

Dwa lub trzy neutrony wytracone z jądra atomów muszą „trafić” w kolejne jądra ciężkie (i zrobić to jeszcze raz, i jeszcze raz, i tak dalej), doprowadzając do stanu superkrytyczności – sytuacji, w której liczba rozbitych przez neutrony jąder innych atomów rośnie wykładniczo. Pojawiają się tu dwa problemy. Po pierwsze – neutrony muszą trafić w kolejne jądra ciężkie, nie mogą się wymknąć się poza kulę z materiału rozszczepialnego; po drugie – reakcja ta musi trwać tak długo, jak to możliwe. To ostatnie jest bardzo trudne do osiągnięcia, bo wygenerowana w toku reakcji energia rozrywa kulę z materiału rozszczepialnego – dochodzi do eksplozji. Trzeba więc utrzymać materiał rozszczepialny w jego kształcie i zagęszczeniu tak długo, jak to możliwe. By to osiągnąć, należy za wszelką cenę zminimalizować liczbę neutronów, które „uciekają”, nie trafiając w żaden kolejny atom uranu-235 lub plutonu-239. To właśnie zapewnienie optymalnych warunków dla zmaksymalizowania ilości generacji – rozbicia przez neutrony kolejnych atomów – jest *clou* skutecznego designu broni jądrowej.

Jednym ze sposobów na to jest zwiększenie ilości materiału rozszczepialnego, innym – stworzenie sytuacji, w której „uciekające” neutrony są odbijane z powrotem w stronę, z której przybyły. Jeszcze kolejnym – doprowadzenie do ściśnięcia materiału rozszczepialnego (zagęszczenia go). Metodą na to może być na przykład równomierne „otulenie” kuli z materiału rozszczepialnego ładunkami konwencjonalnymi; zdetonowane w odpowiednim momencie, z nanosekundową precyzją, doprowadzą one do ściśnięcia materiału rozszczepialnego; jeżeli w tym samym momencie zostanie on „potraktowany” wiązką neutronów, możliwe staje się doprowadzenie do superkrytyczności i samonapędzającej się reakcji łańcuchowej. Im dłużej uda się utrzymać ową ściśniętą kulę, zanim wydzielana w procesach rozszczepienia energia doprowadzi do jej przekształcenia się w gaz pod wpływem temperatury, a następnie do rozerwania, tym dłużej trwa reakcja łańcuchowa i tym więcej neutronów rozbija kolejne jądra uranu-235 lub plutonu-239 – a w konsekwencji tym większa jest siła eksplozji.

Każde kolejne rozbicie jądra przez neutron uwolniony wskutek rozbicia jądra poprzedniego nazywane jest generacją. Rozbicie pierwszego jądra przez neutron uwalnia kolejne dwa neutrony; te dwa neutrony „trafiają” w kolejne dwa jądra, uwalniając cztery neutrony, te trafiają w kolejne jądra, uwalniając osiem – i tak dalej. Im więcej kolejnych generacji ma miejsce, tym większa siła eksplozji. Ocenia się, że do zużycia całego materiału rozszczepialnego potrzebne jest 50-55 generacji. 99,9 procent całej energii uwalniane jest w ostatnich siedmiu generacjach. Stąd też kluczowe jest utrzymanie „w kupie” spójności materiału rozszczepialnego podlegającego reakcji tak długo, jak to możliwe. Wyszarpanie miliardowych, bilionowych części sekundy, utrzymanie materiału rozszczepialnego wystarczająco skupionego, aby mogła mieć miejsce kolejna generacja, odpowiada za sporą część wysiłków związanych z rozwojem mechanizmów jądrowych. Realizowano to na wiele sposobów. Tworzono na przykład reflektory neutronów zbudowane ze zubożonego uranu, które odbijają uciekające neutrony z powrotem w stronę kuli z materiału rozszczepialnego, pozwalając na utrzymanie reakcji łańcuchowej, oraz – poprzez swoją wagę – spowalniają odrobinę eksplozję. Zmieniano budowę „pestki” z materiału rozszczepialnego, poprzez stworzenie w jej środku pustej przestrzeni, co z kolei ułatwiałoby kompresję jej za pomocą ładunków konwencjonalnych. Same ładunki nie przylegały bezpośrednio do powierzchni pestki; zamiast tego stworzono „lewitującą” pestkę, zostawiając odrobinę przestrzeni pomiędzy ładunkami, a jej powierzchnią, pozwalając na maksymalizację efektów wybuchu ładunków konwencjonalnych. Kolejnym dużym krokiem w ulepszaniu technologii było wypełnienie pustej

przestrzeni w środku pestki gazami – izotopami wodoru, trytem i deuterem. Znajdująca się „w środku” reakcji rozszczepienia mieszanka tych dwóch pierwiastków, poddana gigantycznym ciśnieniom i temperaturze, podlega procesowi syntezy (powstaje hel), w rezultacie której generowana jest nie tylko energia (większe bum!), ale też dodatkowe neutrony, wzmacniające reakcje rozszczepienia, a tym samym siłę eksplozji. O ile z uwagi na małą ilość trytu i deuteru reakcja syntezy sama w sobie nie generuje znaczącej energii, o tyle wydzielające się w jej procesie neutrony pozwalają na znaczące zwiększenie siły eksplozji.

Istnieją dwa podstawowe sposoby na detonację bomby atomowej przy pomocy ładunków konwencjonalnych. Jeden z nich oparty jest o tzw. działo (ang. *gun type design*), drugi zaś, bardziej złożony, o implozję. Oba zostały użyte w bombardowaniach Japonii (działo w przypadku bomby Little Boy zrzuconej na Hiroszimę; implozja w bombie Fat Man, którą zaatakowano Nagasaki). Mechanizm oparty o zasadę działła sprowadza się do wystrzelenia jednej masy złożonej z materiału rozszczepialnego (którego rozmiary nie pozwalają na osiągnięcie masy krytycznej), w drugi, który również sam w sobie nie jest na tyle duży, aby samodzielnie osiągnąć masę krytyczną. Jeżeli jednak obydwa ładunki razem są na tyle duże, aby przekroczyć masę krytyczną, i zostaną ze sobą zderzone wystarczająco szybko, wówczas dojdzie do reakcji łańcuchowej. Zaletą tego rozwiązania jest jego niezawodność. Jeżeli właściwie oceni się, ile uranu potrzebne jest do osiągnięcia masy krytycznej przez obydwie masy z materiału rozszczepialnego, oraz osiągnie się wystarczającą prędkość ich zderzenia, dojdzie do reakcji łańcuchowej, w toku której rozszczepieniu ulegnie na tyle dużo uranu-235, że rezultatem będzie znacząca eksplozja. Amerykanie byli na tyle pewni, że odpowiednio skonstruowany ładunek oparty o zasadę działła ich nie zawiedzie, że nie uznali za potrzebne w ogóle go testować (test Trinity z 16 lipca 1945 roku dotyczył ładunku opartego o implozję). Problemów z ładunkami typu działo jest jednak wiele. Trudno na przykład utrzymać obie masy razem na tyle długo i złączyć je na tyle szybko, aby zużyć znaczącą część materiału rozszczepialnego; rozpoczęta zbyt wcześnie reakcja łańcuchowa doprowadzi do ich rozgrzania i rozerwania – a zatem ulegnie też zatrzymaniu, zanim zużyta zostanie większość materiału rozszczepialnego. W takim przypadku dojdzie do eksplozji – ale będzie ona znacznie mniejsza, niż mogłaby być, gdyby powstały odpowiednie warunki do podtrzymania reakcji łańcuchowej przez dłuższy czas. By podać przykład: w toku reakcji łańcuchowej, która miała miejsce przy zdetonowaniu bomby Little Boy, rozszczepieniu poddane zostało tylko 1,4 procent użytego w niej uranu! Z uwagi na nieefektywność tej metody, konieczne jest użycie znacznych ilości materiału rozszczepialnego. Kolejny problem to możliwość wykorzystania właściwie jedynie uranu-235 – plutonu-239, bardziej podatny na rozpad jąder, nie znajduje zastosowania, bo reakcja łańcuchowa mogłaby się rozpocząć zbyt wcześnie, a tym samym zbyt szybko dobiec końca.

Alternatywnym – i bardziej efektywnym od „działa” – mechanizmem jest ten oparty o implozję. W tym przypadku kula z materiału rozszczepialnego sama w sobie nie jest na tyle gęsta, aby osiągnąć masę krytyczną – a zatem nie dojdzie do spontanicznego zainicjowania reakcji łańcuchowej. Jest więc poddawana „ściśnięciu” (implozji), dzięki oddziaływaniu na nią konwencjonalnych materiałów wybuchowych. Bomba oparta o implozję – szczególnie, jeżeli zastosuje się różnorakie metody na podtrzymanie reakcji łańcuchowej poprzez utrzymanie kuli z materiału rozszczepialnego w całości przez dłuższy czas – pozwala na efektywniejsze wykorzystanie materiału rozszczepialnego, na większą siłę eksplozji lub na zachowanie mniejszych rozmiarów. Wyzwaniem jest tu natomiast sama konstrukcja – trudniejsza niż w przypadku broni opartej o zasadę działła – a więc znalezienie odpowiednich materiałów wybuchowych i zapalników

pozwalających na ich zdetonowanie w dokładnie tym samym momencie. Wytoczenie idealnie okrągłej kuli, pozyskanie odpowiedniego materiału do stworzenia reflektorów, zaprojektowanie „lewitującej pestki” – to wszystko wymaga rozbudowanego zaplecza fizycznego, technologicznego i produkcyjnego. Jeżeli dodatkowo chcemy zwiększyć siłę eksplozji z użyciem trytu, pojawia się kolejna trudność. Konieczne jest również bardzo specyficzne ukierunkowanie fali uderzeniowej będącej efektem eksplozji konwencjonalnych materiałów wybuchowych. Zwyczajowo rozchodzi się ona równomiernie we wszystkich kierunkach, co jednak jest niepożądane, bo skompresowanie „pestki” nie byłoby równomierne. Doprowadzenie do równomiernej kompresji osiągnięte jest przez skomplikowany system „soczewek” – precyzyjnie detonowanych ładunków różnego rodzaju materiałów wybuchowych o różnych parametrach szybkości spalania. W rezultacie kula z materiału rozszczepialnego zostaje zagęszczona, a odległości pomiędzy jądrami atomów zmniejszają się, co w konsekwencji powoduje zmniejszenie średniej drogi swobodnej neutronów oraz zwiększenie prawdopodobieństwa, że dojdzie do reakcji łańcuchowej.

Warto wspomnieć, że prawdopodobnie istnieją alternatywy dla zastosowania skomplikowanych zapalników i ładunków wybuchowych, pozwalające na uproszczenie procesu projektowania ładunku opartego o implozję. Informacje na ten temat nie są jednak dostępne w przestrzeni publicznej.

Podsumujmy. Cały proces wygląda następująco: wybuchają konwencjonalne ładunki okalające „pestkę” z materiału rozszczepialnego, czyli kulę, która otoczona jest z zewnątrz reflektorami neutronów, zaś w środku zawiera pewną ilość trytu. Eksplozja doprowadzająca do kompresji materiału rozszczepialnego oraz wykorzystanie generatora neutronowego pozwalają zainicjować reakcję łańcuchową. Temperatura wytworzona przy rozszczepieniu atomów powoduje fuzję trytu znajdującego się w środku kuli z materiału rozszczepialnego. To z kolei nie tylko generuje jeszcze więcej energii, ale również wydziela więcej neutronów, pozwalając na kontynuowanie i wzmocnienie reakcji rozszczepienia.

Jeszcze bardziej „zaawansowany” proces zachodzi w bombie termojądrowej, która generuje energię zarówno dzięki zjawiskom rozszczepienia, jak i syntezy. Zwróćmy uwagę, że w ograniczonym stopniu reakcja syntezy odbywa się również w przypadku bomby działającej na zasadzie implozji – w środku „pestki” z materiału rozszczepialnego znajduje się niewielka ilość trytu, który pod wpływem ciśnienia i temperatury podlega zjawisku syntezy, generując zarówno energię, jak i kolejne neutrony. W przypadku ładunków termojądrowych siła eksplozji wynikająca z procesów rozszczepienia „ukierunkowywana” jest na drugi ładunek, składający się najczęściej z deuterku litu, otoczonego reflektorem (najczęściej ze zubożonego uranu-238) oraz warstwą poliuretanu. W momencie eksplozji ładunku opartego o implozję temperatura oraz promieniowanie X (ładunek „drugiego stopnia” zgniatany jest właśnie siłą promieniowania X) wygenerowane w momencie eksplozji podgrzewają i zgniatają mieszkankę paliwa fuzyjnego tak mocno, że dochodzi do syntezy. W jej trakcie generowana jest ogromna ilość energii, ale też kolejne neutrony – które wzmacniają reakcję rozszczepienia, zachodzącą w „pierwszym” ładunku. W rezultacie cały proces wygląda tak: eksplozja ładunków konwencjonalnych zapoczątkowuje proces rozszczepienia; ponieważ w środku pestki z materiału rozszczepialnego znajduje się tryt, dochodzi do syntezy i dodatkowo wzmocnienia rozszczepienia. Eksplozja ładunku opartego o rozszczepienie ukierunkowana jest na paliwo fuzyjne, przez co dochodzi do syntezy, która dodatkowo wzmacnia proces rozszczepienia. Mamy więc sekwencję: rozszczepienie-synteza-rozszczepienie-

synteza-rozszczepienie. To, ile energii pochodzi z reakcji rozszczepienia, a ile z syntezy zależy od konkretnego projektu głowicy termojądrowej. Przyjmuje się zazwyczaj, że energia generowana jest tu mniej więcej po równo.

W teorii paliwem rozszczepialnym nie muszą być wyłącznie izotopy uranu-235 oraz plutonu-239. Każdy pierwiastek, który jest na tyle niestabilny (a więc podatny na rozszczepienie) i generuje w procesie rozszczepienia jąder więcej neutronów, niż potrzebne jest do jego rozbicia, mógłby zostać wykorzystany do stworzenia broni jądrowej. W praktyce jednak powstawały mechanizmy oparte wyłącznie o dwa izotopy uranu i plutonu – właśnie te o liczbach masowych (czyli łącznej liczbie neutronów i protonów w jądrze) odpowiednio 235 i 239.

Jak je zdobyć?

Ścieżka uranowa czy plutonowa?

Sposoby na uzyskanie materiału rozszczepialnego służącego do produkcji broni jądrowej zwane są niekiedy ścieżką uranową lub ścieżką plutonową. Chociaż mają ten sam początek – wydobywanie rudy uranu, a następnie wzbogacenie go – na dalszym etapie zasadniczo się różnią. Ścieżka uranowa opiera się na mechanizmach fizycznych (wzbogacanie uranu), plutonowa zaś na zjawiskach chemicznych (reprocesowanie zużytego paliwa jądrowego).

Ruda uranu składa się w przytłaczającej większości (aż 99,3 procenta) z izotopu uranu-238. Tylko około 0,7 procent stanowi uran-235 (do tego są jeszcze śladowe ilości uranu-234). Tymczasem przyjmuje się, że do produkcji broni jądrowej potrzebna jest „pestka” z metalicznego uranu, która składa się w 90 procentach z uranu-235 (choć możliwe jest stworzenie ładunku opartego o uran wzbogacony tylko do 60 procent, a na przykład bomba Little Boy zawierała pestkę z uranu wzbogaconego do 80 procent).

Aby uzyskać materiał rozszczepialny zdolny do produkcji broni jądrowej, należy więc – podążając „ścieżką uranową” – oddzielić od siebie dwa izotopy: uran-235 oraz uran-238 (trzy neutrony więcej w jądrze tego drugiego to właśnie przeszkoda utrudniająca doprowadzenie do jego rozszczepienia). Można to zrobić na kilka sposobów – wszystkie bazują na niezwykle małej, ale jednak wymiernej różnicy w wadze obu izotopów. Należy doprowadzić do tego, by z rudy uranu, składającej się w zaledwie 0,7 procenta z izotopu uranu-235, uzyskać metaliczny uran, w którym zawartość tego izotopu przekracza 90 procent. To w sytuacji, gdy chcemy pozyskać tzw. ***weapons grade uranium***, czyli więc uran przydatny do produkcji broni jądrowej; bo jeżeli potrzebujemy paliwa do wykorzystania w energetyce (lub podążamy „ścieżką plutonową”, o czym za chwilę), wystarczy uran wzbogacony do 3-5 procent (w przypadku większości reaktorów).

Jak do tego doprowadzić?

Urobek (skały) zawierający uran należy poddać obróbce przy pomocy chemikaliów – na końcu tego procesu uzyskujemy „czysty” uran w formie różnorodnych tlenków uranu z przeważającym udziałem jednego z nich – U_3O_8 (ośmiotlenek trójuranu). W trakcie obróbki uran często nabiera żółtej barwy – stąd wzięta się amerykańska nazwa ***yellow cake*** (ang. żółte ciasto). Yellow cake wciąż zachowuje jednak proporcje naturalnej rudy uranu – składa się w 99,3 procenta z uranu-238. Potrzebny jest więc kolejny krok – przekształcenie uranu w gaz. Jedną z niewielu gazowych postaci uranu, jakie można

uzyskać w (relatywnie) dostępnych temperaturach i ciśnieniu, jest UF₆ (sześćciofluorek uranu).

Następnie uran w formie gazowej się wzbogaca – za pomocą kilku dostępnych metod, z których najczęściej stosowaną są kaskady wirówek, i poprzez wykorzystanie wspomnianej wyżej różnicy w masie pomiędzy uranem-235 i uranem-238 uzyskuje się gazową formę uranu zawierającą pożądane stężenie uranu-235. W zależności od procentowej zawartości uranu-235, rozróżniamy uran niskowzbogacony (ang. LEU, *low enriched uranium*; stężenie 3-5 procent) i wysokowzbogacony (ang. HEU, *highly enriched uranium*; stężenie 20 procent lub więcej). Z uwagi na to, że izotopy tego samego pierwiastka mają takie same właściwości chemiczne rozdzielanie odbywa się – jak już wspomnieliśmy – w oparciu o ich marginalnie różną wagę, a tym samym nieco inne właściwości fizyczne. Chociaż istnieje wiele metod rozdzielania izotopów uranu (na przykład przy wykorzystaniu laserów, procesów aerodynamicznych czy rozdzielania elektromagnetycznego – tę ostatnią stosowała w swoim programie jądrowym RPA), najczęściej stosowane są dwie – dyfuzja przez przegrody porowate oraz wirówki gazowe.

Pierwsza z nich wykorzystuje membrany, zawierające mikroskopijne pory, na które kierowany jest strumień sześćciofluorku uranu pod ciśnieniem. Z uwagi na marginalnie mniejszą masę atomy uranu-235 poruszają się odrobinę szybciej, a w związku z tym szansa, że to akurat one (a nie atomy uranu-238) „trafią” w pory w membranie jest odrobinę większa. Ponieważ jednak różnica jest minimalna, przez membranę przenika również wiele atomów uranu-238, co sprawia, że proces trzeba powtarzać wiele razy. W dodatku, ponieważ gaz trafiający do systemu musi być sprężony, konieczne jest wykorzystanie odpowiedniej liczby pomp, co konsumuje ogromne ilości energii i wymaga znacznej przestrzeni. Zakład K-25 w Oak Ridge produkujący wzbogacony uran na potrzeby Projektu Manhattan metodą dyfuzji gazowej zajmował przestrzeń niemal 5 kilometrów kwadratowych i był najdroższym w konstrukcji elementem całego przedsięwzięcia – pochłonął ponad jedną czwartą jego kosztów! (A pracujący w zakładzie inżynierowie poruszali się po nim na rowerach). Pamiętajmy też, że wiele z państw chcących opracować broń jądrową, nie ma (nie miało lub mieć nie będzie) możliwości działania w sposób jawny, a ukrycie przed światem instalacji zajmującej sporą przestrzeń i konsumującą ogromne ilości energii to wyzwanie cokolwiek karkołomne.

Najpopularniejsza – bo najwydajniejsza – obecnie metoda wzbogacania uranu to wykorzystanie wirówek. W niej również „wygrywa się” na niewielkiej różnicy w masie pomiędzy uranem-235 a uranem-238. Wpompowany do próżniowego cylindra sześćciofluorek uranu jest odwirowywany (wirówki obracają się od 50 do 70 tysięcy razy na minutę): w wyniku działania siły odśrodkowej cięższe atomy uranu-238 gromadzą się przy ściankach cylindra, zaś lżejsze atomy uranu-235 bliżej jego osi. Następnie pod wpływem różnicy ciśnień między wejściem gazu a wyjściami frakcji zubożonej i wzbogaconej, sześćciofluorek uranu jest włączany do zewnętrznego systemu rurociągów (nie jest do tego potrzebna ani sprężarka, ani pompa). Dzięki temu zapotrzebowanie na energię jest znacznie mniejsze niż w procesie dyfuzji gazowej[1]. Z uwagi na ograniczoną pojemność pojedynczych wirówek są one ustawiane równolegle w seriach. Podobnie jak w przypadku wzbogacania poprzez dyfuzję gazową również wirówki ustawia się w kaskadach, których każdy kolejny stopień wzbogaca uran nieco bardziej. Przy zastosowaniu wirówek zużycie energii jest o 98 procent niższe, niż to ma miejsce w przypadku dyfuzji gazowej. Wirówki zajmują też znacznie mniej miejsca, łatwiej więc je ukryć. Natomiast z uwagi na ekstremalne przeciążenia, które w nich zachodzą, ich komponenty muszą być niezwykle

precyzyjnie wykonane i wyważone; przy ich budowie wykorzystywane są specyficzne, bardzo wytrzymałe materiały, których wyprodukowanie wymaga zaawansowanej wiedzy technicznej (Układ o nierozprzestrzenianiu broni jądrowej nie zabrania państwom kupna/sprzedaży wirówek, jednak obrót nimi – oraz ich komponentami – jest poddany ścisłej kontroli i reglamentacji). Gaz trzeba następnie z powrotem przekształcić w metal i poddać ów metal niezwykle precyzyjnej obróbce (przypomnijmy: broń jądrowa oparta o implozję wymaga uzyskania możliwie idealnej kuli). Potem zostaje stworzenie odpowiedniej „paczki fizycznej” – mechanizmu broni jądrowej.

Proces wzbogacania uranu przebiega stopniowo, bo stopniowo zwiększa się koncentracja uranu-235. Ma to konsekwencje. Po pierwsze – im bardziej chcemy wzbogacić uran, tym więcej kolejnych kaskad instalacji do separacji izotopów musimy użyć. Po drugie – za każdym razem „wsad” jest nieco bardziej wzbogacony i jest go mniej. To oznacza, że najbardziej energochłonne i najbardziej kosztowne są najwcześniejsze etapy wzbogacania. Praca potrzebna do wzbogacenia uranu z naturalnego poziomu 0,7 procent do 3-5 procent (co umożliwia wykorzystanie go w reaktorach jądrowych w energetyce cywilnej) jest o wiele większa, niż ta potrzebna do wzbogacenia uranu z 20 do 90 procent (poziomy pozwalające na wykorzystanie go jako materiału rozszczepialnego w ładunkach nuklearnych). Narang przedstawia wykres, z którego wynika, że wzbogacenie uranu z poziomu 0,7% uranu-235 do poziomu 20% pochłania dziewięćdziesiąt procent potrzebnych nakładów (wyrażonych w jednostkach zwanych Separative Work Units, SWU). Dla kilograma „wsadu” uranowego cały proces (autor zakłada, że przy wykorzystaniu wirówek) wzbogacania do poziomu 90% wynosić ma nieco ponad 210 SWU; według amerykańskiej Energy Information Administration obecnie koszt jednego SWU wynosi około 100 dolarów[2].

W przypadku ścieżki plutonowej punktem wyjścia również jest wydobycie uranu, przekształcenie go w *yellow cake* i wzbogacenie – natomiast nie do aż tak wysokich wartości. Uran-238, który stanowi większość wsadu umieszczanego w reaktorach jądrowych (gdzie zastosowanie znajduje – przypomnijmy – uran wzbogacony do 3-5 procent), ulega napromieniowaniu w reaktorze: w jego jądra również trafiają neutrony. W rezultacie powstaje uran-239, który jest niestabilny i szybko się rozpada, tworząc między innymi izotop plutonu-239. Zazwyczaj zawartość plutonu-239 w wypalonym paliwie jądrowym jest niewielka; konieczne jest oddzielenie go od innych substratów – pozostałego uranu czy wysoce radioaktywnych produktów rozszczepienia. Metoda oddzielania plutonu-239 od reszty opiera się na jego właściwościach chemicznych i nazywana jest reprocesowaniem lub recyklingiem. Zużyte pręty paliwowe muszą być najpierw schłodzone, następnie rozebrane i rozpuszczone w różnego rodzaju chemikaliach. Ponieważ wypalone paliwo jądrowe jest silnie radioaktywne proces ten musi się odbywać przy zastosowaniu specjalistycznego sprzętu – do którego dostęp, podobnie, jak do chemikaliów pełniących rolę rozpuszczalników, jest ściśle reglamentowany.

Od czego zacząć

Jeśli bierzemy pod uwagę wejście na ścieżkę potencjalnej nuklearyzacji, pierwszym krokiem powinno być ustalenie, jakie dokładnie złoża uranu posiada Polska i jak można je eksploatować. Powinniśmy też podjąć próbę opracowania technologii niezbędnych do obróbki uranu (które już kiedyś posiadaliśmy), a ponadto – choć to

znacznie ostrożniej – rozbudowywać zdolności, które pozwolą myśleć o jego wzbogacaniu. Polska powinna być ostrożna, jeżeli chodzi o wzbogacanie, bo choć nie jest to przez Układ NPT zabronione, to w praktyce Stany Zjednoczone postarały się, aby uniemożliwić rozwinięcie takich zdolności przez swoich sojuszników, wiedząc, że są one kluczowe dla rozwoju programu broni jądrowej.

W dodatku dla wzbogacania uranu trudno znaleźć uzasadnienie ekonomiczne, o co byłoby jeszcze trudniej, jeśli łączyłoby się to z wydobywaniem niskiej jakości rudy uranu z polskich złóż. A to jest znów konieczne, ponieważ import surowca oznacza poddanie się reżimowi nadzoru zewnętrznego. W cytowanej wielokrotnie pracy Naranga znajdziemy przykłady, które wskazują, iż decyzja dotycząca zarówno wyboru konkretnej technologii wzbogacania, jak i tego, czy dany kraj opiera swój program broni jądrowej o ścieżkę plutonową czy uranową, jest w znacznie mniejszym stopniu wypadkową dostępnych mu technologii, a w znacznie większym rezultatem ograniczeń politycznych – przede wszystkim konieczności ukrycia programu.

Tak więc, chociaż najskuteczniejszą i najwydajniejszą obecnie metodą wzbogacania uranu jest wykorzystanie wirówek gazowych, dla niektórych państw (jak Irak czy RPA) opracowanie tej techniki wzbogacania wymagałoby albo zbyt dużych nakładów w związku z brakiem podstaw wiedzy, czy też konieczności zakupu technologii za granicą – co było wykluczone z uwagi na nadzór nad nimi.

Teoretycznie istnieje możliwość rozwinięcia zdolności do reprocessowania zużytego paliwa jądrowego, czyli wybór „ścieżki plutonowej”. Niezbędne jest do tego posiadanie odpowiedniego reaktora (powielającego, czyli takiego, który umożliwia pozyskanie plutonu ze zużytego w nim paliwa jądrowego). Jeżeli jednak miałby on posłużyć czemuś więcej niż kształceniu kadr i zbieraniu wiedzy, reaktor ten nie mógłby powstać przy współudziale innych państw ani być zasilany importowanym paliwem – oczywiście z uwagi na ścisły nadzór IAEA. Doskonale ilustruje to przykład Tajwanu i dziury wywierconej przez tamtejszych techników w zbiorniku ze zużytym paliwem – jej odkrycie doprowadziło do tego, że Waszyngton wymusił na Tajpej zakończenie programu broni jądrowej[3]. Wreszcie, w teorii Polska mogłaby też rozważyć „ścieżkę torową” – a więc proces, w którym pierwiastek chemiczny tor napromieniowywany jest w reaktorze, tworząc dzięki temu naddatek uranu u-233.

Kolejny krok to pozyskanie wiedzy o konstrukcji mechanizmów nuklearnych, aspektach działania „paczki fizycznej”, charakterystyce fizycznej części składowych broni (od detonatorów po reflektory neutronów), modelowaniu komputerowym samej eksplozji, obliczeniach dotyczących jej siły itd. Równolegle muszą się toczyć prace nad zdolnościami konwencjonalnymi – na przykład wykorzystaniem rakiet o adekwatnym zasięgu, które, choć przystosowane do przenoszenia ładunków konwencjonalnych, mogłyby zostać użyte do przenoszenia ładunków jądrowych. Istotne jest też posiadanie środków pozwalających na samodzielne desygnowanie celów i naprowadzanie na nie środków przenoszenia (należy też prowadzić badania nad konkretną charakterystyką tych środków, przede wszystkim w kontekście ich przeżywalności). Niezbędne jest również posiadanie systemów dowodzenia i kontroli nad (ściśle hipotetycznymi) zdolnościami, upewnienie się, że są one przystosowane do przetrwania pomimo prób ich zniszczenia – do czego potrzebne jest odpowiednie rozgraniczenie stref odpowiedzialności pomiędzy władzami cywilnymi a wojskowymi.

Jakie są możliwości wydobywania uranu w Polsce z istniejących złóż? Jakie zdolności są potrzebne do samodzielnej ich eksploracji? Fakt, że złoża takie istnieją, pozwala myśleć o zdolności do przeprowadzenia procesu wzbogacania całkowicie

samodzielnie. Oczywiście jest to proces niezwykle drogi i skomplikowany oraz wymagający skonstruowania lub zakupu wielu maszyn i narzędzi, wypracowania protokołów i wykształcenia kadr – natomiast nie ma fizycznych barier dla jego przeprowadzenia. Wiadomo, że złoża uranu w Polsce istnieją. Pomiędzy końcówką lat 40. XX wieku a rokiem 1968 wydobywano uran pozyskiwany z czterech kopalni w Sudetach i jednej w Górach Świętokrzyskich. W latach 60. w Kowarach powstał nawet zakład obróbki uranu do formy *yellow cake*, który działał do 1972 roku, kiedy to został zamknięty w związku z wysokimi kosztami wydobycia i wyczerpywaniem się złóż w Sudetach.

Zdaniem IAEA polskie złoża uranu w Polsce są niskiej jakości; badania tych złóż, o których agencja wiedziała w 2018 roku, wskazują, że zawierają one pomiędzy 250 a 1100 ppm (ang. *particles per million*, części na milion) uranu (1000 ppm to 0,1% uranu). Zwyczajowo złoża uranu o zawartości 1000 ppm opisywane są właśnie jako niskiej jakości, te o koncentracji surowca do poziomu 20000 ppm – jako wysokiej jakości. Niektóre złoża w Kanadzie zawierają zaś aż 200000 ppm uranu[4]. Pomimo tego dokument IAEA wskazuje, że polskie złoża liczą łącznie około 100000 ton uranu. Ponieważ ruda uranu składa się w około 99,3 procenta z uranu-238, oznaczałoby to, że owe 100 tysięcy ton uranu mogłoby posłużyć do zdobycia 700 ton uranu-235 – przynajmniej teoretycznie. Dodajmy, że w kwietniu 2024 roku Świętokrzyska Grupa Przemysłowa Industria S.A. poinformowała o odkryciu nowych złóż uranu, zlokalizowanych w Górach Świętokrzyskich[5]. ŚGP nie ujawniła na razie ich dokładnej lokalizacji, wielkości i potencjalnych sposobów eksploatacji. Nie jest to natomiast proces, który da się ukryć przed światem, nawet gdyby Polska nie była członkiem NATO, UE, IAEA i innych organizacji. Gdyby Warszawa zdecydowała się na rozwój własnego cyklu paliwowego w oparciu o wydobywany z własnych złóż uran, a także własne instalacje do jego obróbki i wzbogacenia, fakt ten zostanie odnotowany. Z pewnością pociągnęłoby to za sobą skierowane do Polski pytanie: po co to robicie?

[1]

[2] <https://www.eia.gov/uranium/marketing/>

[3] [PRZYPIS DOLNY] W teorii Polska mogłaby też rozważyć „ścieżkę torową” – a więc proces, w którym pierwiastek chemiczny tor napromieniowywany jest w reaktorze, tworząc dzięki temu naddatek uranu u-233.

[4] <https://inis.iaea.org/records/x80wn-t6276#:~:text=Uranium%20mining%20activities%20in%20Poland,in%20the%20Holy%20Cross%20M>

[5] <https://www.kierunekenergetyka.pl/artykul,103996,sgp-industria-s-a-dokumentuje-zloze-uranu-w-województwie-swietokrzyskim-oraz-dazy-do-utworzenia-gospodarki-zamknietego-obiegu-w-energetyce-jadrowej.html>