

Pluton : zagrożenia i wykorzystanie

Znaczenie plutonu dla energetyki

Uran występujący w przyrodzie składa się z dwóch izotopów, U-235 i U-238. Tylko U-235, który stanowi mniej niż 1 % uranu, jest rozszczepialny w reaktorach termicznych i może nam dostarczać energii. Reszta, a więc ponad 99% uranu wydobywanego z ziemi, to izotop uranu U-238, który można wykorzystać dopiero, gdy podczas pracy reaktora wychwyci on neutron i zamieni się w pluton Pu-239. Ilość rudy uranowej w wierzchnich warstwach ziemi jest ograniczona, więc przy wykorzystywaniu tylko U-235 stanęlibyśmy za kilkadziesiąt lat wobec braku paliwa uranowego.

Na szczęście pluton Pu-239 jest rozszczepialny i może być wykorzystany jako paliwo jądrowe. Już obecnie pluton dodaje się do paliwa jądrowego wykonywanego z mieszaniny tlenków uranu i plutonu, tzw. paliwa MOX (Mixed OXides). W przyszłości oczekuje się, że w reaktorach IV generacji przy każdym rozszczepieniu jądra U-235 będzie powstawać więcej niż jedno jądro plutonu Pu-239. Dzięki temu ilość paliwa jądrowego nie będzie maleć – przeciwnie, będzie rosła, co pozwoli zaspokoić potrzeby energetyczne ludzkości przez tysiące lat. Ponadto recykling paliwa i użycie plutonu do produkcji nowych elementów paliwowych pozwala zdecydowanie zmniejszyć ilość i aktywność odpadów radioaktywnych. W perspektywie setek lat użycie plutonu jest więc dobrym rozwiązaniem problemów energetycznych ludzkości.

Ale właśnie dlatego, że pluton może być obfitym źródłem energii, przeciwnicy energetyki jądrowej zwalczają najostrzej rozwój prędkich reaktorów powielających wykorzystujących pluton jako główne paliwo i straszą plutonem jako rzekomo najgroźniejszą trucizną znaną człowiekowi. Ralf Nader oświadczył, że gram plutonu wystarczy do zabicia 17 milionów ludzi¹. Przy okazji awarii w Fukushima aktywiści antynuklearni twierdzili, że pluton z paliwa typu MOX stwarzał zagrożenie dla Tokio², a wypalone paliwo w basenach miało być zagrożeniem dla życia na całej kuli ziemskiej³.

Jednakże propaganda aktywistów antynuklearnych opiera się na błędnym założeniu, że cała ilość plutonu uwolniona do atmosfery zostaje wchłonięta i zatrzymana w organizmie człowieka. Błędne są też oceny groźby stwarzanej przez cząstki plutonu w płucach, kościach i całym organizmie człowieka. Nie są to drobne różnice kilkunastu czy nawet kilkuset procent – współczynniki błędu wynoszą setki tysięcy razy. Sprawdźmy więc, jakie jest zagrożenie od wchłoniętego plutonu, a następnie, ile tego plutonu może dostać się do organizmu człowieka. Dopiero potem ocenimy, jakie zagrożenie naprawdę stanowi pluton.

Zagrożenie od plutonu w organizmie człowieka

Główne zagrożenie ze strony plutonu powstaje, gdy po uwolnieniu z systemu zamykających go barier tworzy on zawiesinę drobnego pyłu w powietrzu i dostaje się przy oddychaniu do płuc. Można prosto obliczyć wielkość zagrożenia. Gdy wdycha się tlenek plutonu w postaci drobnego pyłu, to 25% tego pyłu pozostaje w płucach, 38% w górnym odcinku układu

¹R. Nader, speech at Lafayette College (Spring 1975).

²<http://enews.com/study-fukushima-plutonium-effect-melting-mox-fuel-lead-neutron-flux-blow-surprisingly-absolutely-data-scientific-literature-refer>

³<http://agreenroad.blogspot.com/2013/08/dr-holger-strohm-fukushima-radiation.html>

oddechowego, a reszta jest wydychana na zewnątrz⁴. W ciągu kilku godzin usuwany jest z organizmu pluton, który osadził się w górnym odcinku układu oddechowego oraz 40% plutonu osadzonego w płucach. Pozostałe 60% plutonu w płucach - to jest $(0,25 \times 0,60 =)$ 15% całości wdychanego plutonu, pozostaje w płucach przez dwa lata, a więc długo, ale dużo krócej, niż wynosi okres połowicznego rozpadu plutonu.

Znając ilość plutonu w płucach, w kościach i w pozostałych organach człowieka, oraz uwzględniając czas, przez jaki pluton przebywa w nich, zanim zostanie wydalony wskutek procesów biologicznych, B. Cohen określił dawkę promieniowania, jaką otrzymuje organizm człowieka odjednostkowej mikrograma plutonu⁵. Przyjmując pesymistycznie założenie, że każda nawet najmniejsza dawka promieniowania powoduje zagrożenie (tzw. hipoteza liniowa bezprogowa LNT) i ekstrapolując do zera skutki dużych dawek otrzymanych przez ludzi, którzy przeżyli bombardowanie Nagasaki lub Hiroszimy oraz górników narażonych na działanie radonu, amerykański Komitet Oceny Biologicznych Skutków Promieniowania (BEIR) opracował zależność ryzyka zachorowania na raka od dawki napromieniowania płuc⁶. Wiele prac wskazuje, że hipoteza LNT jest zbyt pesymistyczna i promieniowanie przy małej mocy dawki nie jest szkodliwe. Ale przyjmując wskaźnik oparty na tej hipotezie możemy być pewni, że stosujemy podejście pesymistyczne, najbardziej ostrożne i rzeczywistość nie będzie gorsza od naszych przewidywań.

Zwykle wymieniany jako główne zagrożenie izotop plutonu Pu-239 o okresie połowicznego rozpadu 24 000 lat nie jest największym emitorem promieniowania. Inne izotopy plutonu o krótszych okresach połowicznego rozpadu ulegają rozpadowi szybciej, a więc na jednostkę czasu emitują więcej promieniowania. Dlatego współczynniki zagrożenia od mieszaniny izotopów plutonu typowej dla paliwa reaktorowego są wyższe niż dla samego Pu-239.

Uwzględniając te okoliczności, prof. Cohen w obszernym studium na temat plutonu wykazał, że można oczekiwać średnio jednego hipotetycznego zachorowania na nowotwory na każde 200 mikrogramów mieszaniny izotopów plutonu wchłoniętych i zatrzymanych w płucach, lub na 1 gram mieszaniny izotopów plutonu wchłoniętych drogą pokarmową.⁷

Nie oznacza to, że przy wchłonięciu mniejszej ilości plutonu nie ma skutków zdrowotnych, a powyżej następuje nieuchronne zachorowanie. Według hipotezy LNT przyjmuje się, że jeśli N porcji plutonu po 200 mikrogramów zostanie wchłoniętych do płuc grupy ludzi dużo większej od N, to można oczekiwać N zachorowań na nowotwory. Praktyczne obserwacje dużych grup ludności narażonych na promieniowanie gamma wykazują, że takie podejście jest zbyt pesymistyczne, ale daje ono możliwość udowodnienia, że szkodliwość plutonu nie jest tak wielka jak twierdzą agitatorzy antynuklearni.

Wskaźniki szkodliwości promieniowania plutonu na tle innych izotopów.

Rozpad plutonu powoduje emisję cząstki alfa, która przekazuje dużą ilość energii na krótkiej drodze i ma bardzo mały zasięg. Jak groźne jest uderzenie cząstki alfa w komórkę?

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (MAEA) przy współudziale innych organizacji ONZ jak np. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) opracowała ogromne zbiory współczynników opisujących działanie promieniowania emitowanego przez różne izotopy.

⁴International Commission on Radiological Protection (ICRP), Task Group on Lung Dynamics, "Deposition and Retention Models for Internal Dosimetry of the Human Respiratory Tract" *Health Physics* 12, 173 (1966)

⁵B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977)

⁶National Academy of Sciences Committee on Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR), "Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation" (1980) United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), "Sources and Effects of Ionizing Radiation" (1977)

⁷B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977).

Jednym z tych wskaźników jest wielkość dawki otrzymanej wskutek jednego rozpadu jądra plutonu. Jest ona mierzona w siwertach na bekerel [Sv/Bq]. Dla plutonu pochłoniętego drogą oddechową wynosi ona dla dorosłych przy powolnym długoterminowym wchłanianiu 0,016 mSv/Bq.⁸

Jest to wielkość znacząca, ale nie należy przyjmować twierdzeń, jakoby jedna milionowa grama plutonu oznaczała śmierć na raka. Fakty przeczą takim twierdzeniom. W latach 40-tych XX wieku 26 pracowników w zakładach zbrojeniowych USA uległo skażeniu plutonem. Staranne badania zdrowia tych ludzi prowadzone przez szereg lat nie ujawniły żadnych złych skutków zdrowotnych ani przedwczesnych zgonów, które można byłoby przypisać temu skażeniu⁹. W latach 90-tych grupa ochotników wchłonęła pluton drogą oddechową i poprzez bezpośrednie zastrzyki – również bez skutków ujemnych.¹⁰ Gdy Ralph Nader określił pluton jako najbardziej toksyczną substancję znaną człowiekowi, prof. Cohen zaproponował, że przed kamerą TV zje tyle tlenku plutonu, ile Nader zje kofeiny¹¹, dla której w czystej postaci przy przyjęciu doustnym dawka powodująca 50% prawdopodobieństwo zgonu u szczurów wynosi 192 miligramy na kilogram¹². Nader nie przyjął wyzwania.¹³

Chociaż brak bezpośrednich danych doświadczalnych o częstości chorób nowotworowych spowodowanych przez pluton w organizmach ludzi, mamy szereg wyników badań na zwierzętach, psach, królikach, szczurach i myszach¹⁴. Wyniki tych badań potwierdzają, że oceny według wskaźników BEIR oraz wg danych opublikowanych przez MAEA, WHO i inne organizacje ONZ prowadzą do wyników większych niż zagrożenie rzeczywiście występujące.¹⁵

Wielkość zagrożenia od plutonu możemy też ocenić porównując je z zagrożeniem od polonu Po-210 w tych samych warunkach, to jest dla osób dorosłych przy powolnym wchłanianiu. Wskaźnik dla polonu wynosi ono 0,00434 mSv/Bq. Oznacza to, że rozpad jednego atomu plutonu Pu-239 jest czterokrotnie bardziej szkodliwy, niż rozpad atomu polonu Po-210. Ale pluton jest starannie oddzielony od środowiska człowieka, nikt nie wdycha go na co dzień. Natomiast polon Po-210 jest nieodłącznym składnikiem dymu papierosowego.¹⁶ Brytyjski Instytut Badań Nowotworów podaje, że przemysł tytoniowy wie o tym dobrze i przez ponad 40 lat próbował obniżyć zawartość polonu w tytoniu – ale bezskutecznie¹⁷. Osoba paląca półtorej paczki papierosów dziennie dostaje rocznie dawkę promieniowania taką, jak przy 300 prześwietleniach klatki piersiowej promieniami rentgena.¹⁸ Osoba paląca 2 paczki papierosów dziennie otrzyma w ciągu 25 lat łączną dawkę około 800 mSv. Zagrożenie powodowane promieniowaniem polonu 210 przy paleniu papierosów jest więc realne. Ale

⁸Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards table III.2D, 2E jointly sponsored by EC, FAO, IAEA, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf

⁹G. L. Voelz, "What We Have Learned About Plutonium from Human Data," *Health Physics*, 29 (1975).

¹⁰<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium.aspx>

¹¹Bernard L. Cohen in *Nuclear Energy*; Karl Otto Ott and Bernard I. Spinrad, eds. (New York: Plenum Press, 1985), pp. 355–365.

¹²Peters, Josef M. (1967). "Factors Affecting Caffeine Toxicity: A Review of the Literature". *The Journal of Clinical Pharmacology and the Journal of New Drugs* (7): 131–141.

¹³[https://en.wikipedia.org/wiki/Bernard_Cohen_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bernard_Cohen_(physicist))

¹⁴W. J. Bair, "Toxicity of Plutonium," *Advances in Radiation Biology*, Vol. 4, p. 225 (1974).

¹⁵B. Cohen The myth of plutonium toxicity, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4684-4589-3_23#page-1

¹⁶<http://scienceblog.cancerresearchuk.org/2008/08/29/radioactive-polonium-in-cigarette-smoke/>

¹⁷Waking a Sleeping Giant: The Tobacco Industry's Response to the Polonium-210 Issue *Am J Public Health*. 2008 September; 98(9): 1643–1650. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2509609/>

¹⁸Radioactivity in cigarette smoke. *N Engl J Med*. 1982 Jul 29;307(5):309-13.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7088089>

zagrożenie to przyjmujemy obojętnie. Natomiast zagrożenia od hipotetycznej groźby rozproszenia plutonu zostały mocno wbite w świadomość społeczną przez aktywistów antynuklearnych i są skutecznie wykorzystywane jako argument przeciwko energetyce jądrowej.

Zastanówmy się teraz, jaka część plutonu rozproszonego w powietrzu dotarłaby do organizmu człowieka.

Wchłanianie plutonu po rozproszeniu go w powietrzu.

Powyżej podaliśmy, jaka frakcja plutonu wdychanego przez człowieka osadza się w płucach. Należy przy tym uwzględnić, że trudno jest rozprószyć pluton w powietrzu jako pył, który można wdychać. Pojedyncze cząstki plutonu mają tendencję do koagulacji w bryłki o rozmiarach zbyt dużych, by można było wchłaniać je drogą oddechową. W doświadczeniach ze zwierzętami trzeba było sztucznie rozdrabniać pluton by spowodować wdychanie jego pyłu¹⁹. W przypadku awarii reaktorowych jest to oczywiście niemożliwe. A przede wszystkim – nawet przy rozdrobnieniu i rozproszeniu plutonu tylko jego mała część jest wdychana przez ludzi.

Cohen przeprowadził obliczenie, w którym założył pesymistycznie, że kilogram plutonu zostaje w postaci drobnego pyłu rozproszony w Nowym Jorku przy przeciętnych warunkach pogodowych²⁰. Obliczenia rozpraszania atmosferycznego przeprowadzone zgodnie z wymaganiami dozoru jądrowego USA²¹ wykazały, że w ciągu godziny, zanim wiatr wywieje pył plutonu z gęsto zaludnionego rejonu, zaledwie 1 cząstka na 100 000 byłaby wchłonięta przez ludzi drogą oddechową²², co oznacza wchłonięcie do płuc ludzi 10 miligramów plutonu. Ale to obliczenie zostało wykonane dla gęstości zaludnienia równej 10 000 mieszkańców na km². W warunkach polskich, przyjmując gęstość zaludnienia taką jak w Warszawie to jest 3500 mieszk/km², otrzymamy wynik 3-krotnie niższy, to jest sumaryczne wchłonięcie do płuc grupy narażonych mieszkańców około 3,5 mg plutonu. Przy ilości powodującej średnio jedno hipotetyczne zachorowanie na nowotwór wynoszącej 200 mikrogramów plutonu oznacza to wystąpienie 18 hipotetycznych zachorowań nowotworowych.

Wchłanianie plutonu z osadu na ziemi.

Zagrożenie powodowane bezpośrednio wdychaniem rozproszonego w powietrzu pyłu plutonu występuje przy przeciętnych warunkach atmosferycznych przez krótki czas do chwili, gdy pył plutonu zostanie usunięty wiatrem z wdychanego powietrza.

Potem cały pył plutonowy osiadnie na ziemi, ale wciąż będzie możliwość, że zostanie on powtórnie uniesiony wskutek wiatru lub działań człowieka. To niebezpieczeństwo maleje pod wpływem deszczu, rosy i innych procesów naturalnych i zanika niemal kompletnie po upływie roku²³. W sumie ocenia się, że unoszony w powietrze z ziemi pył plutonu spowoduje dodatkowe 5 hipotetycznych zgonów.

¹⁹J. E. Park, W. J. Bair, and R. H. Busch, "Progress in Beagle Dog Studies with Transuranium Elements at Battelle-Northwest," *Health Physics*, 22, 803 (1972)

²⁰B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977).

The Medical Research Council, *The Toxicity of Plutonium* (Her Majesty's Stationery Office, London, 1975); C. W. Mays, "Discussion of Plutonium Toxicity," in R. G. Sachs (ed.), *National Energy Issues-How Do We Decide* Ballinger, Cambridge, Massachusetts, 1980)

²¹U.S. Atomic Energy Commission, "Meteorology and Atomic Energy." (1968)

²²B. Cohen The myth of plutonium toxicity, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4684-4589-3_23#page-1

²³K. Stewart, in *The Resuspension of Particulate Material from Surfaces*, B. R. Fish (ed.), (Pergamon Press, New York, 1964); L. R. Anspaugh, P. L. Phelps, N. C. Kennedy, and H. C. Booth, Proceedings of the Conference on

W ciągu kilku lat pluton przeniknie głęboko do ziemi stając się składnikiem górnej warstwy gleby. Pluton pozostaje radioaktywny przez wiele lat. Jego szkodliwość będzie zależała od tego, jakie jest prawdopodobieństwo powtórnego uniesienia cząstek plutonu w powietrze wskutek orki, prac budowlanych i procesów naturalnych, a następnie wchłonięcia ich przez ludzi drogą oddechową. O wiele lżejszy od plutonu cez (izotop cez-137), który opadł po awarii w Czarnobylu w bardzo niewielkich ilościach m.in. na terenie Polski, znajduje się obecnie już kilka metrów pod powierzchnią ziemi.

Przeciętny atom znajdujący się w górnych 20 cm gleby ma 13 szans na miliard na rok by dostać się do organizmu człowieka²⁴. W długim okresie czasu pluton w glebie może być także wchłonięty przez korzenie roślin i dostać się w ten sposób do naszego pożywienia. Proces ten badano w wielu kontrolowanych doświadczeniach oraz w sytuacjach skażeń występujących po wybuchach bomb i w rejonach składowania odpadów radioaktywnych²⁵. Prawdopodobieństwo takich procesów silnie zależy od warunków geograficznych, ale nawet w najbardziej niekorzystnych warunkach może ono spowodować mniej niż jeden hipotetyczny zgon w ciągu dziesiątków tysięcy lat.

Sumaryczne zagrożenie od rozproszonego plutonu

W sumie, kilogram plutonu rozproszonego w powietrzu w mieście o takiej gęstości zaludnienia jak Warszawa przy przeciętnych warunkach meteorologicznych może spowodować średnio 18 hipotetycznych zgonów wskutek wdychania pyłu w ciągu pierwszej godziny, z dalszymi 5 zgonami wskutek unoszenia pyłu w powietrze w ciągu pierwszego roku i jednym zgonem w ciągu dziesiątków tysięcy lat, gdy pluton pozostaje w górnej warstwie gleby. Łącznie daje to 24 możliwe hipotetyczne zgony na kilogram rozproszonego sztucznie rozdrobnionego plutonu.²⁶

Często wysuwa się obawę, że rozproszony pluton może być narzędziem terroryzmu. Jest to jednak mało realistyczne, bo żaden zgon nie nastąpiłby wcześniej niż po 10 latach, a większość byłaby opóźniona o 20 do 40 lat – a terroryści chcą mieć ofiary śmiertelne natychmiast. Nie można też użyć plutonu jako narzędzia szantażu, bo z chwilą gdy ludzie dowiedzą się o jego rozproszeniu, mogą łatwo podjąć działania ochronne, oddychając przez chusteczkę lub chroniąc się wewnątrz budynków. Znacznie skuteczniejszą bronią dla terrorystów są substancje chemiczne, które są znacznie łatwiejsze do zdobycia, jak gaz

Environmental Behavior of Radionuclides Released in the Nuclear Industry, International Atomic Energy Agency (Vienna, 1975). K. Stewart, in *The Resuspension of Particulate Material from Surfaces*, B. R. Fish (ed.), (Pergamon Press, New York, 1964); L. R. Anspaugh, P. L. Phelps, N. C. Kennedy, and H. C. Booth, Proceedings of the Conference on Environmental Behavior of Radionuclides Released in the Nuclear Industry, International Atomic Energy Agency (Vienna, 1975).

²⁴B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977).

http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1977/05000/Hazards_from_Plutonium_Toxicity_3.aspx

²⁵H. R. McLendon et al., International Atomic Energy Agency Document IAEASM-199/85, p. 347 (1976) - Savannah River Plant; R. C. Dahlman, E. A. Bondiotti, and L. D. Eyman, Oak Ridge National Laboratory Environmental Sciences Division Publication 870 (1976) - Oak Ridge; E. W. Wicker, Colorado State University Report COO-1156-80 (1975) - Rocky Flats, Colorado; E. M. Romney, A. Wallace, R. O. Gilbert, and J. E. Kinnear, International Atomic Energy Agency Document IAEA-SM-199/73, p. 479 (1976) - Eniwetok

²⁶B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977).

http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1977/05000/Hazards_from_Plutonium_Toxicity_3.aspx

The Medical Research Council, *The Toxicity of Plutonium* (Her Majesty's Stationery Office, London, 1975); C. W. Mays, "Discussion of Plutonium Toxicity," in R. G. Sachs (ed.), *National Energy Issues-How Do We Decide* (Ballinger, Cambridge, Massachusetts, 1980)

paraliżujący, który daje natychmiastowe wyniki w postaci trupów leżących na ulicy. Są one również możliwe do samodzielnego wyprodukowania w przeciętnym laboratorium, w przeciwieństwie do plutonu, który wymaga posiadania reaktora i zakładu przerobu wypalonego paliwa.

Zagrożenie globalne przy masowym zastosowaniu plutonu jako paliwa reaktorowego

Wysuwano też obawy, że pluton może spowodować skażenie całego świata. Przeciwnicy energetyki jądrowej, np. John Gofman, piszą o zagrożeniu plutonem na bazie tzw. „zatrzymywania 99,99%”²⁷. Ma to oznaczać, że co rok uwalnia się frakcja wynosząca 0,01% plutonu użytkowanego na świecie i pozostaje w postaci pyłu zawieszonego w powietrzu przez bardzo długi czas.

Ale taka frakcja uwolnień jest zupełnie nierealna. Nawet przy produkcji stali i asfaltu zakłady przemysłowe powodują mniejsze uwolnienia, często na poziomie 0.001%. Przy manipulacjach z plutonem frakcje uwolnień są dużo mniejsze. Dlaczego?

Przy produkcji stali i asfaltu materiały nagrzewa się do temperatur wyższych od temperatury topnienia, co powoduje gwałtowne wrzenie, stanowiące zasadniczy mechanizm unoszenia materiału jako pyłu zawieszonego w powietrzu. W elektrowniach jądrowych temperatura plutonu jest niższa od temperatury topnienia. W czasie operacji technologicznych stal i asfalt znajdują się w otwartych kadziach, wystawionych bezpośrednio na działanie atmosfery w halach produkcyjnych, podczas gdy pluton jest zawsze szczelnie zamknięty i całkowicie izolowany od atmosfery. Powietrze z budynku może mieszać się z powietrzem atmosferycznym tylko przechodząc przez filtry. Whutach i rafineriach produkujących stal i asfalt są to filtry powietrza ze zwykłych tkanin, podczas gdy w zakładach wykorzystujących pluton stosuje się filtry o wysokiej skuteczności, zatrzymujące 99,9999% pyłu zawartego w przepływającym przez nie powietrzu.

Wg wymagań Environmental Protection Agency (EPA) w USA ucieczka plutonu w postaci pyłu zawieszonego w powietrzu nie może przekraczać jednej cząstki na miliard²⁸. Wszystkie zakłady jądrowe pracują zgodnie z tymi wymaganiami. Jest to 100 000 razy mniej niż uwolnienia przyjmowane przez przeciwników energetyki jądrowej. Prędkie reaktory powielające BN-800 (o mocy 789 MWe) zawiera 2,215 kg plutonu klasy militarnej.²⁹ Gdyby 1000 takich prędkich reaktorów powielających pracowało zgodnie z przepisami EPA, to dozwolona ucieczka plutonu wyniosłaby $2215 \text{ kg} \times 1000 \times 10^{-9} / \text{rok} = 0,0022 \text{ kg/rok}$. Gdyby wszystkie te reaktory znajdowały się w miastach o gęstości zaludnienia takiej jak w Warszawie, gdzie jak pokazaliśmy powyżej rozproszenie 1 kg plutonu powoduje 24 zgony, to po pracy tych reaktorów przez 50 lat można byłoby oczekiwać $0,0022 \text{ kg/rok} \times 50 \text{ lat} \times 24 \text{ zgony/kg} = 2,64 \text{ zgonu}$. Wobec tego, że zakłady prowadzące produkcję paliwa plutonowego położone są poza miastami, skutki zdrowotne byłyby znacznie mniejsze, dużo mniejsze niż jeden zgon na stulecie (zakładamy pesymistycznie, że każda dawka promieniowania jest szkodliwa).

Zagrożenia od uwolnień plutonu w razie awarii

Oczywiście przepisy EPA nie obejmują uwolnień w razie awarii. Dwie najbardziej znane awarie z uwolnieniami plutonu to pożary w zakładach produkcji bomb atomowych w Rocky Flats w Kolorado, USA, gdzie pluton znajduje się w postaci łatwopalnej (natomiast

²⁷J. Gofman, *National Forum* (Summer, 1979). J. Gofman, *National Forum* (Summer, 1979).

²⁸U.S. Environmental Protection Agency, *Federal Register*, 40, 23420 (1975)

²⁹http://fissilematerials.org/blog/2015/12/russian_bn-800_fast_breed.html

tlenki plutonu używane w energetyce jądrowej są niepalne)³⁰. Podczas pożaru w 1957 roku 1 część na 300 000 płonącego plutonu uwolniła się do atmosfery w postaci pyłu. Po tym pożarze wprowadzono szereg zabezpieczeń, tak że przy dużo większym pożarze w 1969 roku do atmosfery uwolniła się tylko 1 część na 30 milionów spalonego plutonu. Analizy bezpieczeństwa wskazują, że nowe zabezpieczenia zmniejszają znacznie nawet te niskie uwolnienia.

Wobec tego, że pożary i inne awarie będą dotyczyły tylko bardzo małej frakcji plutonu podlegającego corocznie procesom produkcyjnym, uwolnienia będą stanowiły dużo mniej niż jedną miliardową. Jest to mniej niż uwolnienia rutynowe dozwolone przez przepisy EPA i ich całkowity wpływ na zdrowie byłby mniejszy niż jeden zgon na stulecie w całych USA.

Jakie mogło by być uwolnienie plutonu z basenów wypalonego paliwa w Fukushima?

W wypalonym paliwie znajduje się 8,9 kg izotopów plutonu na tonę paliwa, które pracowało przez 3 lata w reaktorze o mocy 1000 MWe. W basenach Fukushimy było 1300 zestawów paliwowych. Paliwo MOX było wykorzystywane tylko w reaktorze nr 3. Poza tym była to pierwsza partia MOX, pracowała w rdzeniu od września 2010, czyli pół roku³¹, zatem łączna zawartość Pu-239 i Pu-240 mogła wynosić ok. 2,5 kg/t, a nie 8,9 kg/t. Albo nawet mniej, bo część Pu jest wypalana w czasie pracy reaktora. Przyjmując jednak, że całe paliwo w basenach EJ Fukushima mogłoby być wykonane jako paliwo MOX i pomijając wypalenie plutonu, przy wadze typowego zestawu paliwowego reaktora BWR równej 281 kg, otrzymamy łączną wagę paliwa w 1300 zestawach równą 365 ton, w tym $365 \times 8,9 \text{ kg} = 3250 \text{ kg}$ plutonu. Taką kilkakrotnie zawyżoną ocenę podają działacze antynuklearni, np. Helen Caldicott³². Dalej różnice między straszącymi czytelnika artykułami a rzeczywistością są większe, nie kilka, ale setki tysięcy razy. Wynikają one stąd, że np. dr Caldicott przelicza ilość plutonu w basenach na mikro dawki powodujące zachorowania na raka³³, nie uwzględniając szeregu zjawisk obniżających wchłonięcia plutonu.

Dopóki pluton nie osiągnie temperatury topnienia, wydzielenia z paliwa są pomijalnie małe. Dla dwutlenku plutonu temperatura topnienia to 2390 °C, a temperatura wrzenia to 2800 °C³⁴. Podgrzew wypalonego paliwa do tej temperatury w basenie paliwowym jest niemożliwy, bo odbiór ciepła w drodze konwekcji naturalnej w powietrzu zatrzyma wzrost temperatury na znacznie niższym poziomie.

Wg NUREG 1465³⁵ w przypadku stopienia rdzenia reaktora – a więc najcięższej możliwej awarii – frakcja plutonu, jaka wydzieliła się z paliwa BWR w zbiorniku reaktora wynosi 0,0002, a w przypadku dalszego topienia rdzenia poza zbiornikiem dodatkowo 0.005 aktywności zawartej w całym rdzeniu. Gdyby paliwo w basenach uległo stopieniu i osiągnęło temperaturę wrzenia, to zgodnie z wynikami doświadczeń, w których celowo topiono paliwo, frakcja plutonu uwolniona do atmosfery wyniosłaby 0,0052.

Przyjmując wg NUREG 1465 maksymalnie możliwą frakcję uwolnienia plutonu do atmosfery wynoszącą 0,0052 otrzymujemy maksymalne hipotetycznie możliwe uwolnienie plutonu z basenów w Fukushima równe $3250 \times 0,0052 = 16.9 \text{ kg Pu}$.

³⁰U.S. Atomic Energy Agency, "Plutonium and Other Transuranic Elements: Sources, Environmental Distribution, and Biomedical Effects," Document WASH-1359 (1974).

³¹<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/plutonium.aspx>

³²<http://agreenroad.blogspot.com/2013/08/how-dangerous-is-400-6000-pounds-of.html>

³³Caldicott, Helen; *The Medical Implications of Fukushima*; July 10, 2013.

<http://japansafety.wordpress.com/2013/07/10/the-medical-implications-of-fukushima-helen-caldicott/>

³⁴[https://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium\(IV\)_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium(IV)_oxide)

³⁵L. Soffer et al.: Accident source terms for Light Water NPPs, NUREG 1465.

Biorąc pod uwagę usuwanie pyłu plutonu z warstwy powietrza nad ziemią wskutek normalnych zjawisk atmosferycznych nawet po uwolnieniu plutonu w mieście o gęstości zaludnienia takiej jak w Nowym Jorku oraz fakt, że z wchłoniętego plutonu tylko 15% pozostaje w płucach, okazuje się, że z plutonu uwolnionego hipotetycznie w Fukushima w płucach ludzi pozostałoby tylko

$3250 \text{ kg} \times 0,0052 \times 0,15/100\ 000 = 0,025 \text{ gramów Pu.}$

Zgodnie z pesymistyczną hipotezą że każda dawka promieniowania jest szkodliwa, wywołałoby 0,025 g/0,0002 g/zachorowanie = 125 zachorowań na nowotwory. Wobec tego, że w Japonii gęstość zaludnienia wynosi 336 osób.km²³⁶, liczba zachorowań wyniosłaby 125 x 0,0336 = 4,3 zachorowań. Byłaby to wielkość zupełnie nieznacząca w stosunku do normalnej częstości zachorowań na nowotwory z przyczyn naturalnych i niewykrywalna żadnymi metodami.

Tokio jest oddalone od Fukushimy od 280 km. Stężenie plutonu przy typowych warunkach meteorologicznych (prędkość wiatru 4 m/s) w kierunku wiatru maleje 1000 razy przy wzroście odległości z 20 m do 1000 m³⁷.

O zagrożeniu Tokio odległego o 280 km nie ma co mówić.

Podsumowanie zagrożeń rozpraszaniem plutonu w razie osuszenia basenów wypalonego paliwa w Fukushima.:

1. W czasie awarii w Fukushima nigdy nie było ucieczki wody z basenów wypalonego paliwa.
2. Temperatura topnienia dwutlenku plutonu jest tak wysoka, że nawet po utracie wody wypalone paliwo nie podgrzałoby się tak bardzo, by ją osiągnąć
3. Póki paliwo jest w postaci stałej, uwolnienia plutonu są pomijalnie małe.
4. Gdyby dwutlenek plutonu wydostawał się ze stopionego paliwa, to ulotniłaby się tylko mała jego część, około 0,005 zawartości w paliwie.
5. Pył z cząstkami plutonu w ciągu godziny usuwany jest przez wiatr i osiadanie na powierzchni ziemi z warstwy powietrza którym oddychają ludzie. W tym czasie nawet w mieście o gęstym zaludnieniu tylko 1 stutysięczna plutonu zostałaby wchłonięta drogą oddechową przez ludzi.
6. Z plutonu wchłoniętego przez oddychanie tylko około 15% pozostaje w płucach, reszta jest wydychana.
7. Dawka promieniowania przypadająca na rozpad atomu plutonu jest około 4 razy większa niż polonu Po-210. Polon Po-210 jest nieodłącznym składnikiem dymu papierosowego, jest wdychany przez palaczy papierosów i powoduje znaczące napromieniowanie ich organizmów. Mimo to ludzie nie boją się promieniowania przy paleniu papierosów
8. Pluton wchłonięty drogą pokarmową jest 5000 razy mniej groźny niż wchłonięty przez oddychanie.

Wniosek: Środki ostrożności .stosowane przy wykorzystaniu plutonu w elementach paliwowych typu MOX są potrzebne. Nie ma natomiast podstaw do straszenia ludzi rzekomym możliwym wzrostem umieralności z powodu awarii basenów paliwowych w Fukushima. Zabezpieczenia stosowane dziś przez energetykę jądrową są wystarczające.

W przyszłości, gdy pluton będzie stosowany jako zasadnicze paliwo w reaktorach powielających, będziemy też potrafili zabezpieczyć ludzkość przed jego szkodliwym działaniem – a zawarte w plutonie zasoby energii posłużą nam przez tysiące lat.

³⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Demography_of_Japan

³⁷B. L. Cohen, "Hazards from Plutonium Toxicity," *Health Physics*, 32, 359 (1977)