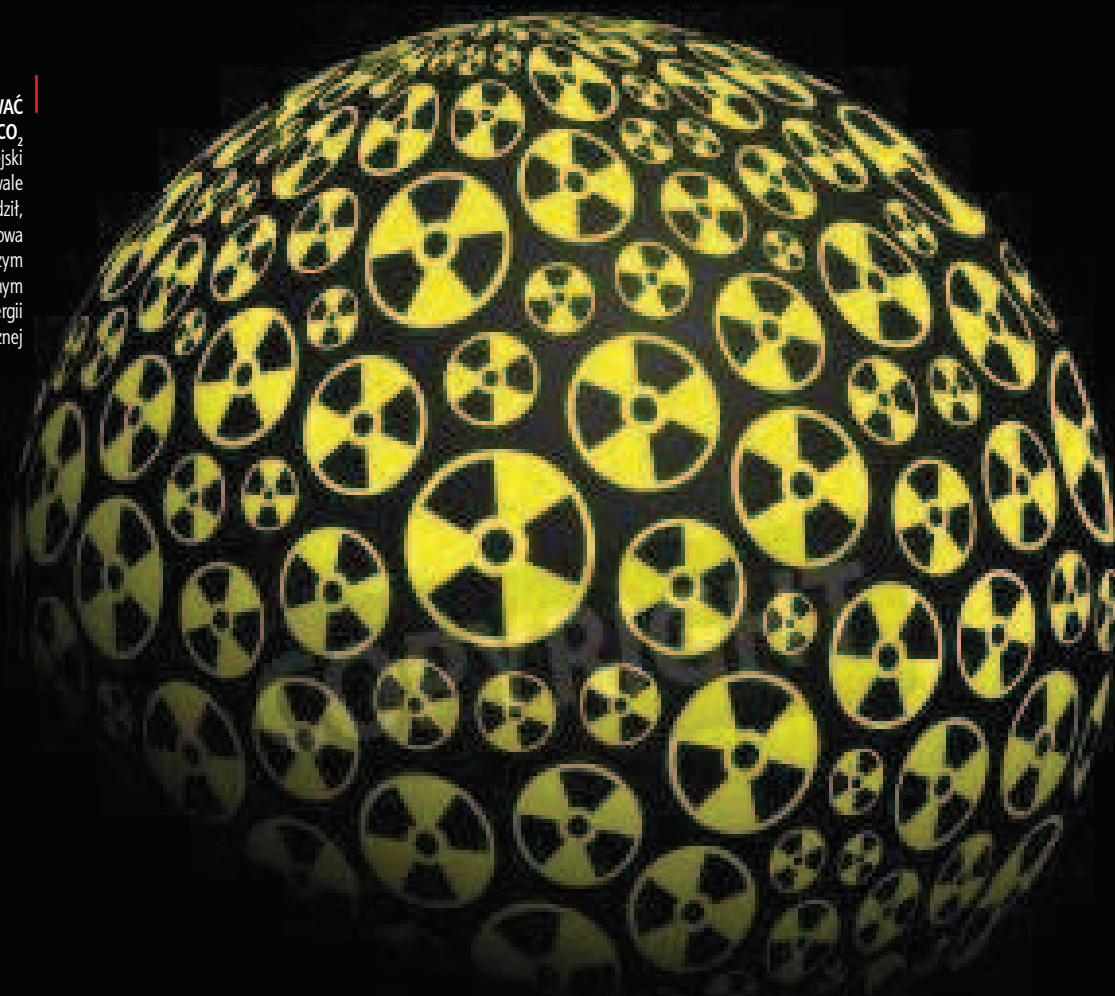


**ZREDUKOWAĆ
EMISJĘ CO₂**
Parlament Europejski
w swej uchwale
z 2007 roku stwierdził,
że energia jądrowa
jest największym
niskoemisyjnym
źródłem energii
elektrycznej



Atom lekiem na CO₂?

Bilans energetyczny i emisje CO₂ energetyki jądrowej

dr inż. A. Strupczewski

prof. nadzw. NCBJ

Kolejne raporty IPCC podają coraz groźniejsze perspektywy wynikające z ocen skutków globalnego ocieplenia klimatu Ziemi. Stąd Unia Europejska stawia krajom członkowskim coraz wyższe cele w zakresie redukcji emisji CO₂. Jednocześnie na przykładzie Niemiec i Hiszpanii widać, że gwałtowne rozwijanie OZE prowadzi do obciążeń finansowych i problemów technicznych, których nawet najbogatsze gospodarki świata nie wytrzymują¹. Warto więc sprawdzić, czy można zredukować emisje CO₂, wprowadzając stabilne i tanie źródło energii elektrycznej – energetykę jądrową.

Parlament Europejski w swej uchwale z 2007 roku stwierdził, że energia jądrowa jest największym niskoemisyjnym źródłem energii elektrycznej². Natomiast organizacje antynuklearne z uporem twierdzą, że energetyka jądrowa emituje – lub emitować będzie – więcej gazów cieplarnianych niż elektrownie gazowe. Pomijając pytanie, w czym interesie są takie twierdzenia, zastanówmy się tylko nad emisjami z energetyki jądrowej.

Oczywiste jest, że elektrownie jądrowe nie emitują w czasie swojej pracy dwutlenku węgla, bo przecież nie spalają one substancji organicznych. Ale praca elektrowni to tylko jedno z ogniw długiego łańcucha działań niezbędnych dla wytworzenia energii elektrycznej, od wydobycia surowców poprzez budowę urządzeń do likwidacji elektrowni i unieszkodliwiania odpadów. A każda czynność połączona z zużyciem energii oznacza emisję gazów cieplarnianych. Dlatego należy sporządzać oceny emisji i bilans energetyczny dla cyklu całego życia (Life Cycle Analysis) dla każdego rodzaju źródeł energii.

Mniej o ponad 2 mld ton CO₂ rocznie

W przypadku energii jądrowej sprawa kompletności analizy jest szczególnie ważna, bo przeciwnicy energetyki jądrowej wysuwają alarmujące twierdzenia o rzekomych ogromnych emisjach w różnych fazach cyklu paliwowego, wprawdzie niezgodne z faktami, ale zamieszczane w internecie i powtarzane chętnie przez media. Na szczęście w krajach cieszących się zasłużoną opinią rzetelności – takich jak Szwecja i Wielka Brytania – prowadzone są oceny energii potrzebnej w całym cyklu pracy instalacji jądrowych i związanych z nimi emisji gazów cieplarnianych. Oceny te są sporządzane przez towarzystwa energetyczne, weryfikowane przez niezależne urzędy państwowe i podawane do

wiadomości publicznej, a ich autorzy ponoszą odpowiedzialność prawną. Dzięki temu nie musimy wysuwać przypuszczeń co do wielkości potrzebnych nakładów energetycznych i związanych z nimi emisji CO₂ – wszystkie potrzebne wielkości można znaleźć w dokumentach sprawdzonych i opublikowanych.

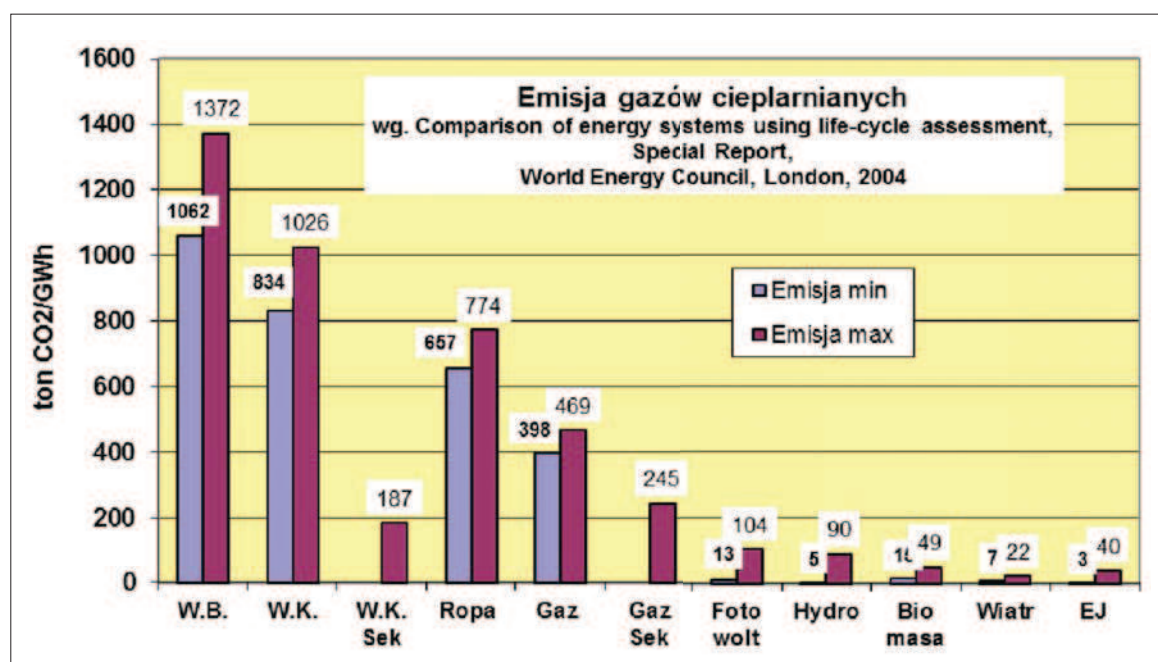
Zarówno Światowa Rada Energetyczna – World Energy Council³, jak i IPCC stwierdziły, że energetyka jądrowa jest głównym niskoemisyjnym źródłem energii elektrycznej zapewniającym stabilne zasilanie odbiorców.

Obecnie energetyka jądrowa pozwala uniknąć emisji ponad dwóch miliardów ton CO₂ rocznie. Każde 22 tony uranu wykorzystanego jako paliwo w EJ zaoszczędza milion ton CO₂, które spowodowałyby spalanie węgla⁴. Gdybyśmy hipotetycznie zamknęli wszystkie EJ w Unii Europejskiej i zastąpili je elektrowniami o istniejącej strukturze wytwarzania energii elektrycznej (poza hydroelektrowniami, których mocy nie można tak łatwo powiększyć), to roczna emisja CO₂ wzrosłaby z 1,3 do 2 miliardów ton, a więc o 704 miliony ton CO₂. Oznaczałoby to wzrost emisji o 53,4% rocznie. Jest to wielkość równa całkowitej emisji CO₂ z 200 milionów samochodów osobowych w Unii Europejskiej (722 milionów ton rocznie).

Szczegółowy bilans emisji CO₂ na poszczególnych etapach cyklu paliwowego wraz z budową EJ i jej likwidacją, a także z unieszkodliwianiem odpadów pokazuje rys. 2.

Energia uzyskiwana w EJ

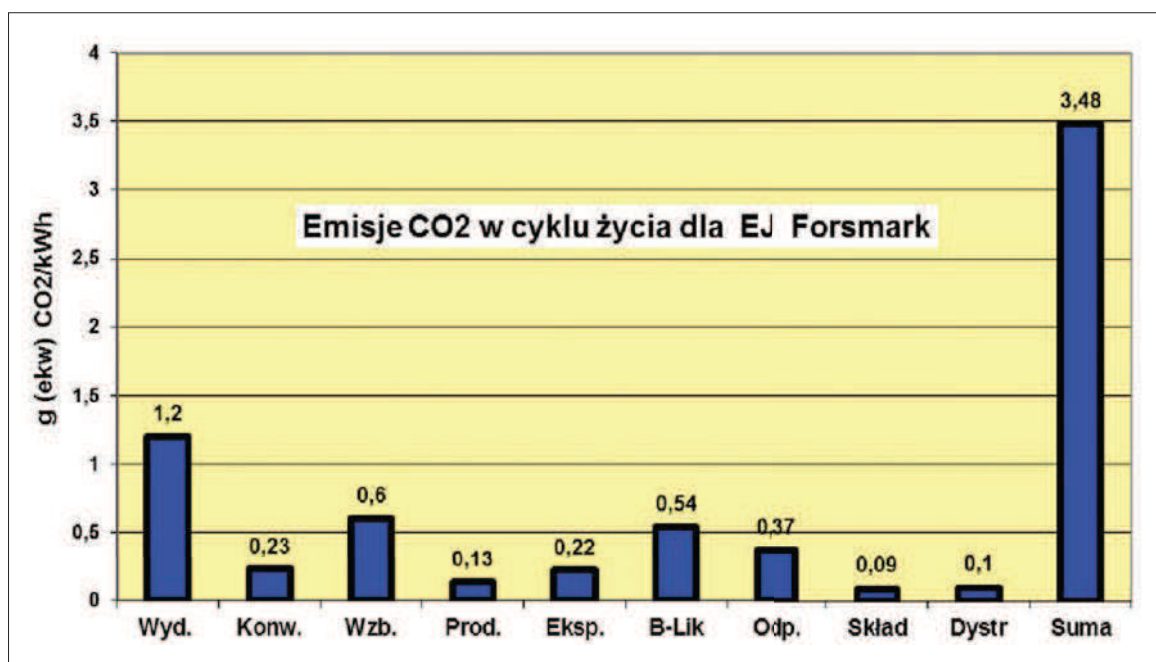
Przy obecnie stosowanej głębokości wypalenia 45 000 MWd/t(U) i współczynnika sprawności cieplnej 37% energia elektryczna uzyskiwana z tony paliwa wyniesie 0,4 TWh/(t(U)). Dla otrzymania 1 kg uranu



RYS. 1
Zestawienie emisji gazów cieplarnianych powodowanych przez różne źródła energii elektrycznej, opracowane wg danych Światowej Rady Energetycznej. W.B. – węgiel brunatny, W.K. – węgiel kamienny, Sek – z sekwestracją spalin, wartości dla EJ – minimalna – przy wzbogacaniu wirówkowym, maksymalna – przy wzbogacaniu dyfuzyjnym

RYS. 2

Bilans emisji CO₂ w cyklu jądrowym, dane wg deklaracji wpływu na środowisko dla EJ Forsmark5. Skróty na rysunku: Wyd – wydobywanie i oczyszczanie uranu, Konw – konwersja w UF₆, Wzb – wzbogacanie, Prod – produkcja paliwa, Eksp – eksploatacja EJ, B-Lik – budowa i likwidacja EJ, Odp – gospodarka odpadami radioaktywnymi, Skład – budowa składowiska odpadów, Dystr – dystrybucja energii



w postaci UO₂ jako paliwa reaktorowego potrzeba 8,9 kg U₃O₈⁶, a więc z 1 tony uranu naturalnego w postaci U₃O₈ otrzymamy energię elektryczną 44,9 GWh/(t U_{nat}), lub po przeliczeniu na energię cieplną 485 TJ/(t U_{nat}). Przyjmując jako podstawę do rozważań EJ o mocy 1000 MWe pracującą przy współczynniku obciążenia 85% przez okres 40 lat, otrzymujemy łączną ilość energii wytwarzanej w takiej elektrowni równą:

$$1000 \text{ MWe} \times 8760 \text{ h/rok} \times 0,85 \times 40 \text{ lat} = \\ = .297,84 \cdot 10^6 \text{ MWh} = 297 \text{ TWh}$$

a w przeliczeniu na energię pierwotną 3240 PJ. Zapotrzebowanie na uran dla tej elektrowni jądrowej (w tekście będzie oznaczona skrótem EJ) wyniesie łącznie 742,5 tony uranu naturalnego.

A jaka energia potrzebna jest na wszystkie działania związane z budową elektrowni, jej eksploatacją i likwidacją, włączając w to wydobywanie rudy uranowej i produkcję paliwa, a po jego wypaleniu w elektrowni jądrowej – unieszkodliwianie odpadów?

Zapotrzebowanie energii w cyklu całego życia elektrowni jądrowej

Oceny ilości energii potrzebnej w cyklu całego życia elektrowni są bardzo rozbieżne, w zależności od tego, kto je publikuje, czy przemysł jądrowy i obiektywne organizacje międzynarodowe, czy też przeciwnicy energetyki jądrowej. Najbardziej wiarygodne są oceny wykonywane na podstawie rzeczywistych danych publikowanych w ramach raportów o oddziaływaniu elektrowni jądrowych na środowisko, sprawdzanych przez urzędników ministerstwa środowiska i podlegających takim samym rygorom wiarygodności i odpowiedzialności jak zeznania podatkowe.

Największy wkład w bilans energetyczny – a więc

i w emisje gazów cieplarnianych – ma wzbogacanie uranu. Dotychczas dominowała metoda dyfuzyjna, stosowana od czasu II wojny światowej, wymagająca dużo energii, rzędu 2400 kWh/SWU i powodująca emisje szkodliwych gazów, takich jak CFC-114. Od wielu lat jednak wprowadzana jest metoda wirówkowa wymagająca 50-krotnie mniej energii (około 40 kWh/SWU)⁷ i niepowodująca emisji szkodliwych gazów. W perspektywie 2020 roku można oczekiwać, że dyfuzja gazowa zostanie wyeliminowana i wzbogacanie będzie realizowane tylko metodą wirówkową. Dlatego w bilansach emisji CO₂ i energii dla obecnie pracujących EJ uwzględnia się udziały uranu wzbogaconego pochodzące z obu tych procesów, a w ocenach dla przyszłych elektrowni jądrowych przyjmuje się jako wariant podstawowy właśnie wzbogacanie wirówkowe.

Bardziej kontrowersyjną sprawą jest nakład energii potrzebnej do wydobywania rudy uranowej i nakłady energii potrzebnej na budowę i likwidację elektrowni jądrowych. Szczególnie rażące są rozbieżności między ocenami aktywistów antynuklearnych opłacanych przez Greenpeace i inne organizacje zwalczające energetykę jądrową a danymi faktycznymi dla kopalni rudy ubogiej, o niskiej zawartości uranu. Dwa przykłady rozbieżności między ocenami aktywistów antynuklearnych a rzeczywistością omówimy poniżej.

Energia potrzebna na wydobywanie i oczyszczenie uranu

Kontrowersje na temat energii potrzebnej na wydobywanie i oczyszczenie uranu zaczynają się już przy ocenie obecnych kopalni, chociaż istnieją dla nich łatwo dostępne dane podlegające kontroli rządów i akcjonariuszy.

W przeciwieństwie do danych publikowanych przez przemysł jądrowy i organizacje międzynarodowe,

takie jak World Energy Council, aktywiści antynuklearni twierdzą, że emisje CO₂ w obecnym systemie energetyki jądrowej wynoszą 100 g/kWh i do roku 2054 będą rosły do 170 g/kWh. Ten wzrost ma być powodowany wzrostem energii potrzebnej na wydobycie uranu z pokładów coraz uboższej rudy uranowej. Jednakże już pierwsza wartość 100 g/kWh jest sprzeczna z obecną praktyką. Obecne emisje CO₂ na jednostkę energii elektrycznej produkowanej w elektrowni jądrowej wynoszą według danych dla szwedzkiej elektrowni Forsmark 3,48 g/kWh, a dla brytyjskiej elektrowni Torness 5,05 g CO₂/kWh. Gdyby w EJ Torness paliwo produkowano z rudy ubogiej, jak np. wydobywanej w kopalni Olympic Dam, to emisje wyniosłyby 6,85 g CO₂/kWh⁸. Według danych World Energy Council emisje dla energetyki jądrowej wynoszą od 3 do 40 g CO₂/kWh, przy czym wartość niższa odpowiada wzbogacaniu uranu w zakładach wirówkowych, które będą niepodzielnie dominowały na rynku po 2020 roku, a wartość wysoka dla zakładów dyfuzyjnych, które są już obecnie wycofywane z eksploatacji i zastępowane układami wirówkowymi. Wartości 100 i 170 g CO₂/kWh podawane przez aktywistów antynuklearnych są więc zupełnie nierealne.

Według antynuklearnej prognozy na lata po 2054 roku emisje CO₂ będą rosły gwałtownie, przekraczając wartość 400 g/kWh w 2055 roku i rosnąc tak, że na wykresie emisji w funkcji lat tworzą linię pionową. Jest to efekt dwóch założeń przyjętych przez autora tej przepowiedni, holenderskiego aktywisty antynuklearnego van Leeuwena:

po 2054 roku wystąpi deficyt uranu i trzeba będzie eksploatować pokłady rudy bardzo ubogiej,

energia potrzebna na wydobycie i oczyszczenie uranu z rudy o niskiej zawartości U₃O₈ jest bardzo wysoka.

Twierdzenie o deficycie uranu jest sprzeczne z ogólnie

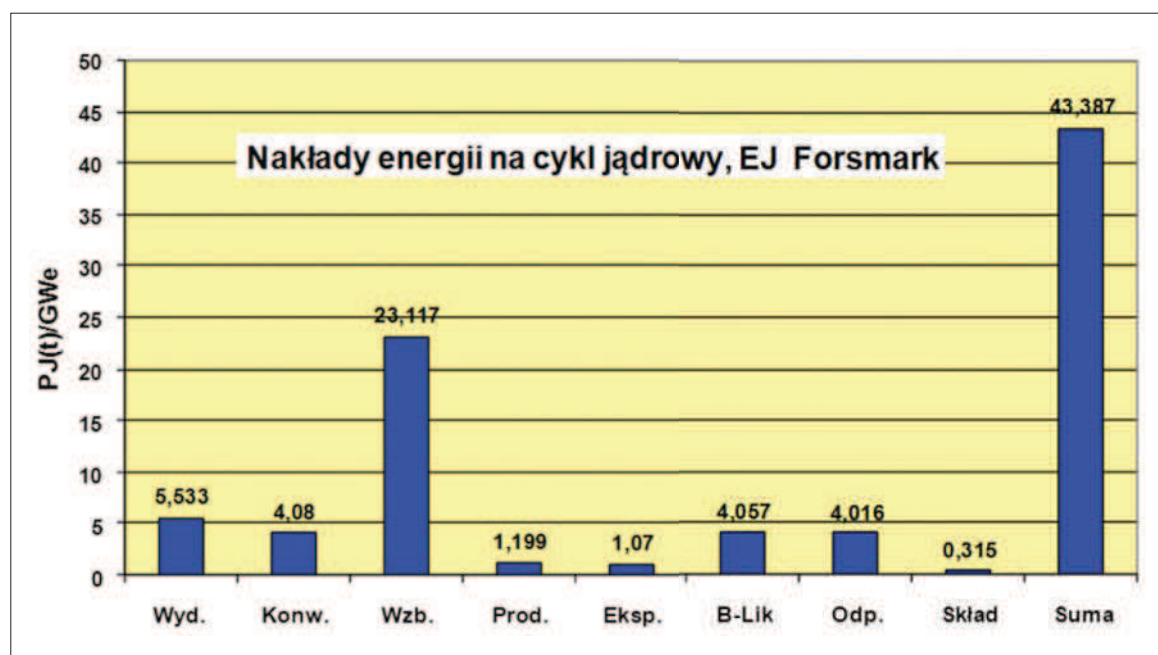
nie przyjętymi ustaleniami, np. z rezolucją Parlamentu Europejskiego z 2007 roku, w której stwierdzono, że uranu wystarczy na 200 lat, a po wprowadzeniu prędkich reaktorów powielających na tysiące lat. Drugie założenie van Leeuwena jest jeszcze bardziej sprzeczne z rzeczywistością. Van Leeuwen zastosował błędny wzór, oparty na danych sprzed 40 lat i zawierający błędne uproszczenia, prowadzące do wyników rażąco sprzecznych z rzeczywistymi danymi dla kopalni uranu, w których prowadzi się eksploatację rud ubogich.

Chociaż fakty mówią inaczej, van Leeuwen twierdzi, że przy wydobywaniu rudy ubogiej, zawierającej około 0,013% uranu, potrzeba będzie energii większej niż energia otrzymywana w reaktorze termicznym z uranu zawartego w tej rudzie⁹. Zdaniem van Leeuwena przy eksploatacji kopalni rudy uranowej nie uwzględnia się energii potrzebnej na rekultywację kopalni, a więc obecne pokolenie zaciąga dług energetyczny, który spłacać będą musiały nasze dzieci i wnuki. Nic dziwnego, że młodzi ekolodzy wierzący Greenpeace'owi są gotowi walczyć, by uchronić świat przed widmem kryzysu energetycznego. Na szczęście rzeczywistość jest zupełnie inna.

Wobec tego, że w przyszłości będzie wykorzystywana uboga ruda uranowa, sprawdźmy ilość energii potrzebnej do wydobycia i oczyszczenia uranu z kopalni wydobywających rudę o niskiej zawartości U₃O₈, bliskiej wartości 0,013% podawanej przez przeciwników energetyki jądrowej jako wartość progowa, poniżej której rzekomo nie można uzyskać dodatniego bilansu w cyklu paliwowym.

Kopalnia Rossing – zawartość uranu około 0,02%

Jako reprezentatywny przykład rozpatrzmy rzeczywiste dane dla kopalni Rossing w Namibii, gdzie wydobywa się obecnie rudę o zawartości uranu równej



RYS. 3

Nakłady energetyczne na cykl jądrowy, dane wg deklaracji wpływu na środowisko dla EJ Forsmark [7]. Skróty na rysunku: Wyd – wydobycie i oczyszczenie uranu, Konw – konwersja w UF₆, Wzb – wzbogacanie, Prod – produkcja paliwa, Eksp – eksploatacja EJ, B-Lik – budowa i likwidacja EJ, Odp – gospodarka odpadami radioaktywnymi, Skład – budowa składowiska odpadów

0,021%U¹⁰. Uran w Rossing zawarty jest w bardzo twardej i szorstkiej skale granitowej zwanej alaskitem. Kopalnia Rossing ma trzecie co do wielkości złoża rudy uranowej na świecie. W 2009 roku, gdy średnia zawartość tlenu uranu w rudzie w Rossing wynosiła 0,031%, wydobyto 54,5 mln ton skały, uzyskując 4150 ton tlenu uranu¹¹.

W ostatnim czasie wydobywano rudę uboższą, zawierającą 0,021% U₃O₈. Doroczny raport kopalni z 2013 roku podaje, że wydobyte uranu naturalnego w 2012 roku wyniosło 2699 ton U₃O₈, a zużycie energii na tonę tlenu uranu U₃O₈ wyniosło 686 GJ/(tU₃O₈) tzn. 809 GJ/t(U)¹². Emisje CO₂ w 2012 roku wyniosły 78,4 tony równoważne CO₂ na tonę tlenu uranu U₃O₈.

Według wzoru stosowanego przez Storm van Leeuwen i Smitha¹³ energia potrzebna na wydobycie i oczyszczanie uranu (bez rekultywacji kopalni) z twardej rudy o zawartości uranu 0,021% wynosi 47,9 TJ/t(U). Gdyby tak było, to przy produkcji rocznej 2699 t U₃O₈ zużycie energii przez całą kopalnię wyniosłoby 109,6 PJ/rok. Tymczasem łączne zużycie energii przez wszystkie kopalnie i zakłady przemysłowe oraz przez wszystkich odbiorców indywidualnych, słowem globalne zużycie energii elektrycznej i ciepłej w Namibii, gdzie znajduje się kopalnia Rossing, wyniosło 69,6,1 PJ(t)/rok¹⁴.

I nikt z nich nie uważa za stosowne porównać swych twierdzeń powtarzanych za SLS z faktami.

Niezależnie jednak od oceny moralnej kampanii organizacji antynuklearnych przykłady wzięte ze współczesnej praktyki wykazują, że ubogie rudy uranu można z pożytkiem wykorzystać dla cyklu jądrowego.

Budowa elektrowni jądrowej

Według deklaracji o wpływie EJ na środowisko opracowanej dla szwedzkiej elektrowni Forsmark, po normalizacji do 1 GWe mocy elektrycznej okazuje się, że energia pierwotna potrzebna na zbudowanie i likwidowanie elektrowni jądrowej wynosi 4 PJ, i zwraca się w ciągu 1,5 miesiąca. Wartość ta została określona na podstawie danych technicznych dla wszystkich stosowanych przy budowie procesów i wszystkich użytych materiałów, z uwzględnieniem zawartości energii w każdym z materiałów dostarczanych na budowę¹⁸. Deklaracja ta jest dostępna także w internecie jako arkusz kalkulacyjny Excela¹⁹, i uznana za wiarygodną przez szereg źródeł, np. World Nuclear Association (WNA), australijski Uniwersytet w Sydney, który na zlecenie rządu Australii przygotował obszerną analizę cyklu jądrowego²⁰, prof. Seviora²¹ z uniwersytetu w Melbourne, a także przez rząd Wielkiej Brytanii²².

Natomiast działacze antynuklearni oceniają wielkość energii potrzebnej na budowę EJ metodą przeliczania nakładów inwestycyjnych na energię przy użyciu wskaźników finansowych określających odpowiedniość kosztów i energii dla produktów przemysłowych w danym kraju. Jednakże proces budowy EJ obejmuje wielkie koszty związane z uzyskaniem lokalizacji i opłatą za teren, prowadzeniem przewodów sądowych, uzyskiwaniem zatwierdzeń, licencjonowaniem, opóźnieniami, opłatami, podatkami, ubezpieczeniem i oprocentowaniem kapitału. Koszty budowy EJ wzrosły w ciągu ostatnich dziesięcioleci bynajmniej nie wskutek istotnego wzrostu ilości materiałów lub energii, lecz raczej wskutek innych powodów, takich jak duże opóźnienia w uruchomieniu elektrowni, rosnące wymagania w zakresie udowodnienia jakości i bezpieczeństwa EJ itd. Jeśli już zbudowana elektrownia nie może rozpocząć pracy z powodu toczącego się przewodu sądowego, to koszty monetarne silnie wzrosną, natomiast koszty energetyczne pozostaną bez zmiany. Dlatego metoda globalnego przeliczania całych kosztów na energię według globalnego wskaźnika finansowego daje wyniki ewidentnie zawyżone.

Cytowany przez Greenpeace Storm van Leeuwen, stosując przeliczanie kosztów na energię, otrzymał wartość energii potrzebnej na budowę EJ wynoszącą około 80-90 PJ/GWe, a więc znacznie większą od liczby 4 PJ(t) podanej dla EJ Forsmark. Ponadto twierdzi on – wbrew zebranym już doświadczeniom z likwidacji elektrowni jądrowych – że na likwidację potrzeba będzie dodatkowo 160 PJ. Uzyskał on tę wartość na podstawie własnych przypuszczeń opartych na wzmiankach w literaturze, że „koszty demontażu EJ



EJ Forsmark wytwarza 75 razy więcej energii niż wynosi suma wkładów energetycznych w całym cyklu jądrowym

Postulowane przez SLS zużycie energii dla jednej kopalni uranu jest więc większe od całkowitego zużycia energii elektrycznej i ciepłej w całej Namibii! Tak wielkie zużycie energii w jednej tylko kopalni uranu nie dałoby się ukryć, zresztą jest ono fizycznie niemożliwe.

Czy to proste przeliczenie nie wystarczy, by wykazać, jakim nonsensem jest postulowany przez SLS wzór do określania energii potrzebnej rzekomo do wydobycia uranu z rud ubogich? A przecież kopalnia Rossing jest jedną z największych na świecie i dostarcza 4% całkowitej światowej produkcji uranu. To nie mała zapomniana kopalnia – trudno jej nie brać pod uwagę. A wzory SLS okazują się błędne i dla innych kopalni, wystarczy porównać ich wnioski z rzeczywistymi danymi, np. dla australijskiej kopalni Olympic Dam.

Na błędnym twierdzeniu SLS opiera się wiele wypowiedzi aktywistów antynuklearnych, którzy już bez żadnych wahań cytują wniosek SLS, że przy zawartości uranu w rudzie poniżej 0,013% cały jądrowy cykl paliwowy powoduje stratę, a nie zysk energii. Czyni tak osławiony wojownik antynuklearny John Busby²⁵, to samo pisze organizacja Friends of the Earth a także Oxford Research Group¹⁶ i Energy Watch Group¹⁷.

mogą sięgać od 100% do 220% kosztów budowy”. Wszystkie dostępne publikacje techniczne zaprzeczają tym wartościom.

Firma Vattenfall określiła całkowitą energię pierwotną potrzebną na budowę i likwidację elektrowni jako równą 8 PJ(t), stosując pomiar rzeczywistych wkładów energetycznych. Dones (2003)²³ również wyliczył nakłady energetyczne jako równe od 7,6 do 9 PJ energii pierwotnej dla budowy i likwidacji EJ z reaktorem PWR. W późniejszym studium Dones (2006) wycenił energię potrzebną na budowę i likwidację w przypadku reaktora EPR 1600 MWe. Okazało się, że wynosi ona 11 PJ energii pierwotnej. Wyniki firmy Vattenfall analizowali i zatwierdzili eksperci rządu szwedzkiego, a wyniki Dones’a otrzymane zostały w ramach programu GABE prowadzonego przez Instytut Paula Scherrera dla rządu Szwajcarii. Wykazują one, że oceny SLS są zawyżone około 30 razy.

Bilans energetyczny dla całego cyklu jądrowego

Po tej demonstracji błędów w ocenach Greenpeace’u można już przedstawić wyniki raportu opracowanego przez szwedzką elektrownię jądrową Forsmark (rys. 3).

Ilości energii potrzebnej do wyprodukowania energii 1 kWh z EJ Forsmark podano w raporcie o oddziaływaniu tej elektrowni na środowisko. W raporcie tym ujęto energię potrzebną na budowę elektrowni, wydobycie i wzbogacenie uranu obecnie stosowanymi metodami (dyfuzyjna i wirówkowa), przekształcenie uranu w paliwo, usuwanie odpadów i likwidację elektrowni. Założono, że czas użytecznej pracy EJ Forsmark wynosi 40 lat. Okazało się, że EJ Forsmark wytwarza 75 razy więcej energii niż wynosi suma wkładów energetycznych w całym cyklu jądrowym. Innymi słowy, nakład energii ze źródeł innych niż jądrowe potrzebny do pracy EJ przez 40 lat zwraca się w ciągu około 5 miesięcy pracy na pełnej mocy. O jakimkolwiek „progno energetycznym” nie ma co mówić.

Oceny te odnoszą się do aktualnie pracujących elektrowni jądrowych. Wszystkie EJ trzeciej generacji oferowane obecnie na rynku zapewniają wyższe wypalenie i mniejsze zapotrzebowanie na uran niż obecnie pracująca flota elektrowni jądrowych. Na tej podstawie można stwierdzić, że emisje CO₂ i bilans energetyczny określone dla EJ Forsmark przedstawiają górną granicę prawdopodobnych emisji i potrzeb energii dla nowych EJ.

Powyższy przegląd danych technicznych i porównanie twierdzeń przeciwników energetyki jądrowej z rzeczywistością potwierdza bez żadnych wątpliwości, że wnioski Parlamentu Europejskiego z 2007 roku wspomniane na początku artykułu są słuszne: energetyka jądrowa jest i będzie największym niskoemisyjnym źródłem energii elektrycznej.

Przypisy

- 1 <http://www.wnp.pl/wiadomosci/222984.html>
- 2 Rezolucja Parlamentu Europejskiego (2007/2091 (INI) z 24 października 2007 roku o źródłach energii konwencjonalnej oraz technologiach energetycznych.
- 3 World Energy Council: Comparison of energy systems using life-cycle assessment Special Report, London 2004
- 4 Ian Hore-Lacy The Future of Nuclear Energy, Paper presented at the Royal College of Physicians Conference, Adelaide 4th May 2000
- 5 http://www.nuclearinfo.net/Nuclearpower/WebHomeEnergyLifecycleOfNuclear_Power/Energy_per_lifecycle_phase_Ian_Martin_051124-1.xls
- 6 <http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power/>
- 7 Dones R. Critical note on the estimation by Storm van Leeuwen J.W. and Smith P. of the energy uses and corresponding CO₂ emissions from the complete nuclear energy chain, PSI, 10.04.2006.
- 8 Carbon footprint of the nuclear fuel cycle Briefing note AEA Technology, March 2006.
- 9 J.W. Storm van Leeuwen: Nuclear power - the energy balance, Uranium, October 2007.
- 10 <http://www.world-nuclear.org/info/country-profiles/countries-g-n/namibia/> updated March 2014.
- 11 <http://www.infomine.com/minesite/minesite.asp?site=rossing>
- 12 Rossing Uranium Limited Working for Namibia, 2012 report to stakeholders, building our future.
- 13 J.W. Storm van Leeuwen, P. Smith : Nuclear Energy The Energy Balance, ch. 2 From Ore to Electricity str. 6.
- 14 International Energy Statistics, 2014 <http://knoema.com/EIA-IES2014/international-energy-statistics-2014>
- 15 The Busby Report
- 16 Jan Willem Storm van Leeuwen Energy from Uranium, Oxford Research Group, July 2006.
- 17 Uranium Resources and Nuclear Energy EWG-Paper No 1/06 Page 31.
- 18 Vattenfall (2005) Vattenfall AB Generation Nordic Countries – Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Forsmarks Kraftgrupp AB (FKA). S-P-00021, June, 2004. Updated 2005. http://www.vattenfall.de/www/vf_com/vf_com/Gemeinsame_Inhalte/DOCUMENT/360168vatt/386246envi/2005-EPD-FKA.pdf
- 19 http://nuclearinfo.net/twiki/pub/Nuclearpower/WebHomeEnergyLifecycleOfNuclearPower/Energy_per_lifecycle_phase_Ian_Martin_051124.xls
- 20 University of Sydney, Australia Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia, Integrated Sustainability Analysis 3 November 2006.
- 21 www.nuclearinfo.net
- 22 UK Government BERR: A White Paper on Nuclear Power: Meeting the Challenge, January 2008.
- 23 Dones R. (2003) “Kernenergie”. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz (Ed. Dones R.). Paul Scherrer Institut, Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. Retrieved from: <http://www.ecoinvent.ch>