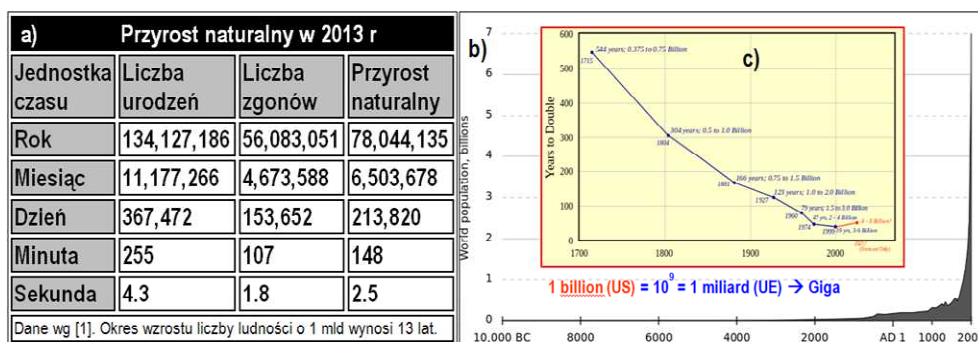


Marek Bartosik

APETYT ENERGETYCZNY CYWILIZACJI A SZANSE JEJ PRZETRWANIA*

Eksplozja demograficzna ludzkości jest faktem. Według obecnych oszacowań, ludność świata osiągnęła 7 miliardów w 2012 r. Nowe prognozy wskazują, że liczebność 8 mld zostanie osiągnięta w 2025 roku. W 2013 r. liczebność naszej populacji była szacowana w granicach – 7,12 ÷ 7,19 mld, a przyrost naturalny wynosił ok. 80 mln/r. Miliard ludzi przybywa ostatnio w ciągu 13 lat (rys. 1) [1, 2, 3].



Rys. 1. Eksplozja demograficzna ludzkości: a) świat – wskaźniki demograficzne w 2013 r [1]; b) globalna populacja ludzka w latach od 10000 p.n.e. do 2010 [1]; c) liczba lat podwajania się liczby ludności na świecie w latach 1700 ÷ 2000 [3]. Szczegółowe prognozy są dostępne w [4].

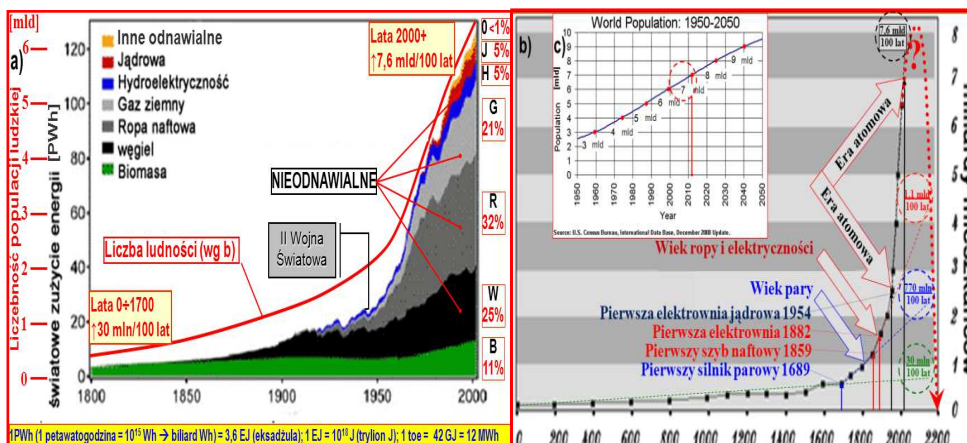
Jeszcze nigdy w historii liczba ludności świata nie wzrastała tak szybko, jak obecnie. Prognozowany okres podwojenia się tej liczby (rys. 1c) z 4 do 8 miliardów jest niewiele dłuższy niż okres jej podwojenia z 2 do 4 miliardów. Świadczy to o gwałtownym przyspieszaniu wzrostu liczebności naszej populacji, ilustrowanego przebiegiem hiperboloidalnym (rys. 1b). Nie może to trwać w nieskończoność. Różnorodne zjawiska wzrastające w taki sposób, w praktyce kończą się jednakowo: gwałtownym załamaniem i głębokim spadkiem. Wydaje się niemożliwe, żeby tak silna tendencja wzrostowa liczby ludności na Ziemi mogła się tragicznie skończyć. Należy jednak najpierw się zastanowić, co ją spowodowało i co ją może zniszczyć.

* Komitet Prognoz „Polska 2000 Plus” PAN: Konferencja „Czy kryzys światowych zasobów?”. Mądralin, 23/24.10.2013 r.

Przez tysiące lat nasza ludzkość rozwijała się względnie powoli, zaspokajając aż do XVII wieku niewielkie potrzeby energetyczne głównie poprzez spalanie biomasy. Obecną cywilizację techniczną, powoli dryfującą wskutek procesów globalizacyjnych i rewolucji informacyjnej ku globalnej technokracji, tworzymy od ponad 320 lat, wykorzystując coraz intensywniej skończone zasoby paliw kopalnych (węгля, ropy, gazu i uranu) zwanych dalej geopaliwami. Są to nieodnawialne źródła energii pierwotnej o bardzo wysokiej koncentracji. Wartości opałowe zostały podane w tabeli 1 (dane wg [5], opr. własne).

Tabela 1. Wartości opałowe WO głównych źródeł energii pierwotnej							
Źródło energii	Biomasa	Biogaz	Węgiel		Ropa naftowa	Gaz ziemny	Rozszczepianie jąder atomów
			kamienny	brunatny			
WO [MJ/kg]	16	17÷27	13÷30	9	45÷46	35	500 000

Na przełomie stuleci, w roku 2000, 86,2% energii pierwotnej zużywanej przez ludzkość pochodziło ze źródeł nieodnawialnych, a pozostała część ze źródeł odnawialnych (biomasa – 11%, w tym biogaz; woda – 2,3%; inne razem – 0,5%). Roczne zużycie energii pierwotnej wyniosło wówczas ok. 420 EJ, roczny wzrost potrzeb ok. 2%¹, a łączna moc generowana przez cywilizację ok. 13 TW².



Rys. 2. Energochłonność cywilizacji technicznej: gdzie:

- globalne zużycie energii z poszczególnych źródeł energii pierwotnej [PWh] w latach 1800÷2004 [7], z dodatkowo naniesioną krzywą (wg rys. 2b) wzrostu liczby ludności [mld];
- globalna eksplozja demograficzna i daty ważne dla energetyki (każdej towarzyszy gwałtowne przyspieszenie przyrostu naturalnego); c) prognoza demograficzna do 2050 r. [4]

¹ Globalny wzrost średniorocznego zapotrzebowania energii pierwotnej, prognozowany wg średniej 30-letniej 1970 ÷ 2000.

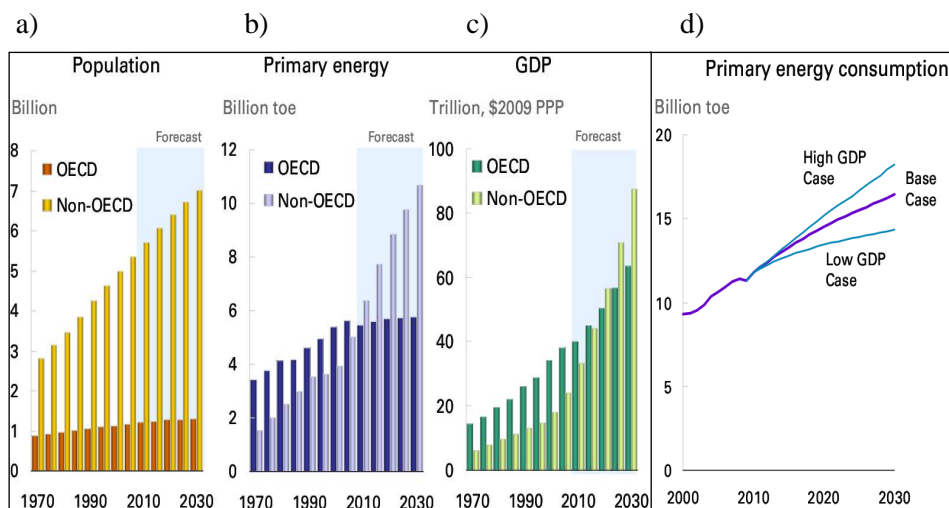
² 1 EJ (eksadzul) = 10¹⁸ J (trylion J); 1 TW (terawat) = 10¹² W (bilion W); jednostki europejskie, (Billion US – patrz rys.1b).

Stopień rozwoju technicznego cywilizacji może być oceniany m.in. według podstawowych źródeł energii wykorzystywanych przez tę cywilizację [6]. Według tego kryterium, ludzka cywilizacja jest określana jako typ zerowy, który zaczął wykorzystywać zasoby swojej planety, ale nie potrafi tego kontrolować.

Związki między stopniem rozwoju technicznego cywilizacji, eksplozją demograficzną oraz wzrostem zapotrzebowania na energię pierwotną są widoczne i oczywiste. Pokazano to na rys. 2.

Ludzkość zużywa coraz więcej energii pierwotnej, w tym zwłaszcza elektrycznej, niezbędnej do zaspokojenia potrzeb materialnych i niematerialnych miliardów ludzi dążących do lepszego życia: bezpiecznego schronienia, ciepła, produkcji i dostaw wyżywienia oraz wody, transportu, wytwarzania i dystrybucji wyrobów przemysłowych, edukacji, nauki, kultury, rozrywki etc. etc.

Nowoczesna gospodarka, o coraz wyższym poziomie technicznego wyposażenia we wszystkich dziedzinach naszego życia, wymaga coraz więcej energii *per capita*, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych. Jeżeli połączyć ten czynnik z eksplozją demograficzną (rys. 2b) oraz procesami globalizacyjnymi, to oczywistą konsekwencją jest lawinowy w skali globalnej wzrost zużycia energii, napędzającej rozwój także krajów słabo rozwiniętych. Tendencja powyższa jest trwała (rys. 3) [8].



Rys. 3. Podzielony świat, w którym żyjemy (OECD³ / nie-OECD) – historia i prognozy 1970 ÷ 2030: a) liczebność populacji ludzkiej; b) zużycie energii pierwotnej; c) wzrost GDP⁴; d) trzy warianty zużycia energii pierwotnej dla trzech scenariuszy wzrostu GDP [8].

³ OECD – Organization for Economic Co-operation and Development (pol. Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju) – organizacja międzynarodowa o profilu ekonomicznym skupiająca 34 wysoko rozwinięte państwa (+ 5 aspirujących).

⁴ GDP – gross domestic product (pol. PKB); PPP – Purchasing Power Parity (pol. PSN – parytet siły nabywczej).

Horyzont czasowy prognoz tego typu, dokonywanych przez międzynarodowe instytucje, to przeważnie rok 2030. Jest to okres zbyt krótki dla prognoz strategicznych o charakterze globalnym. Rozwiązania, podejmowane dla zaspokojenia potrzeb energetycznych w tak krótkim okresie i nieprzewidujące dalszych działań, nie są racjonalne dla bezpieczeństwa energetycznego świata.

W drugiej połowie XX wieku nasze pokolenie zużyło więcej energii niż wszystkie poprzednie pokolenia w całej poznanej dotychczas historii ludzkości (rys. 2a). Lawinowemu wzrostowi liczebności populacji ludzkiej towarzyszyło wejście do eksploatacji na nieznaną dotychczas skalę kolejno węgla, ropy, gazu i uranu. Konsekwencją ich nieodnawialności jest ich skończona wystarczalność⁵.

Nasza cywilizacja techniczna wpadła w pułapkę energetyczną, którą sama sobie stworzyła, ale nie przyjmujemy tego do społecznej świadomości. Istota tej pułapki wynika z elementarnej logiki.

Jeżeli człowieka zamknąć w bunkrze z wiadrem wody, to wcześniej czy później musi ją zużyć. A co potem? Szuka wyjścia. A jeśli go nie znajdzie? Ten człowiek – to nasza cywilizacja techniczna, bunkier – to nasza planeta, a wiadro wody to nieodnawialne geopaliwa. Ta pułapka już działa.

W ludzkiej skali czasu glob ziemski jest układem zamkniętym o skończonych rozmiarach. Ma dwa wielkie źródła energii: zewnętrzne – słońce i wewnętrzne – jądro ziemi. Ma skończone zasoby nieodnawialnych geopaliw. Nasza cywilizacja nie ma skutecznych technologii potrzebnych do wykorzystania wielkich źródeł energii. Ma skuteczne technologie energetyczne potrzebne do wykorzystania geopaliw. Eksploatacja geopaliw wyczerpuje ich rezerwy, proporcjonalnie do szybkości zużywania. Nie ma sensu pytanie, czy zasoby geopaliw się wyczerpią. Jest pytanie kiedy to nastąpi.

Obecnie nie mamy dla naszego modelu „cywilizacji geopaliwowej” żadnej sensownej alternatywy. Do ludzi nie dociera, że zagrożenie kryzysem energetycznym ma charakter globalny, nie lokalny, że wyścig z czasem o przetrwanie i rozwój naszej cywilizacji technicznej trwa już od ponad 300 lat, a czasu jest coraz mniej! Konieczne jest szybkie znalezienie nowego rozwiązania problemu.

Sygnaty ostrzegawcze ze strony specjalistów są niestety często traktowane jako nieuzasadniony katastrofizm. Przeciwwstawiana im jest naiwna wiara w niewyczerpywalność ziemskich zasobów geopaliw, a także lekceważenie ograniczeń technicznych i ekonomicznych ich eksploatacji. Zazwyczaj odrębnie i regionalnie są analizowane problemy wystarczalności poszczególnych źródeł i nośników energii pierwotnej, a lokalne ich niedostatki uważa się za możliwe do uzupełniania z nieokreślonych zasobów zewnętrznych. Dodatkowo presja tzw. środowisk proekologicznych blokuje rozwój energetyki jądrowej (EJ) oraz powoduje zafałszowanie realnych możliwości technicznych i ekonomicznych wykorzystywania odnawialnych źródeł energii (OZE), tylko elektrycznej, stanowiącej ok. 10% zapotrzebowania energii pierwotnej. Celowo jest np. lekceważony problem wystarczalności różnych materiałów do wytwarzania OZE, loso-

⁵ Wystarczalność danych zasobów jest zazwyczaj określana w latach, jako iloraz r/p lub R/P (rezerw do produkcji rocznej).

wego charakteru ich pracy, możliwych do uzyskania gęstości mocy lub energii, sensu wykorzystania ich w transporcie kołowym, morskim, etc. etc.

Te trudne problemy są w skali globalnej niedogodne dla elit politycznych, nie mają rozwiązań pozytywnych, nie dają się politycznie sprzedać elektoratowi i bezpieczniejszemu ich nie podejmować.

Tymczasem pozyskiwanie geopaliw staje się coraz droższe. Gdy stanie się ono nieopłacalne, nasza cywilizacja straci swój ekonomiczno-energetyczny napęd i jej rozwój może się gwałtownie załamać, jeśli nie znajdziemy dostatecznie szybko wyjścia z tego zagrożenia.

Wyczerpywanie się jednego geopaliwa spowoduje przenoszenie ciężaru podtrzymania energetycznego cywilizacji ludzkiej kolejno na pozostałe, aż do ich wyczerpania. Dane statystyczne są powszechnie dostępne, a ich wymowa brutalna. Najpierw należy oczekiwać nasilania się kryzysu naftowego (pierwsze symptomy są już widoczne), a kolejno gazowego, węglowego i uranowego. Obecnie znane OZE nie są w stanie zastąpić geopaliw, zarówno ze względów techniczno-technologicznych, jak i ekonomicznych. Jednak rozwijanie tych technologii wytwarzania i przetwarzania energii elektrycznej, w połączeniu z rozwojem energooszczędnych technologii użytkowania wszystkich rodzajów energii, jest racjonalnym kierunkiem rozwojowym pozwalającym na zmniejszenie intensywności eksploatacji geopaliw, wydłużenie okresu ich wystarczalności i danie ludzkości więcej bezcennego czasu na rozwiązanie problemu pułapki energetycznej, w której się znalazła.

O racjonalności eksploatacji poszczególnych źródeł i wykorzystywania różnych technologii energetycznych decyduje energetyczna stopa zwrotu EROEI⁶. Jej zmniejszanie się wraz z upływem czasu dla ropy, gazu i węgla to efekt wyczerpywania się złóż łatwo dostępnych i wzrostu kosztów wydobycia. Granicą energetycznej opłacalności jest $EROEI = E_r / E_i > 1$, gdzie E_r – energia zawarta w surowcu energetycznym, E_i – energia potrzebna do jego pozyskania. Wartości EROEI podane w [9] mają duży rozrzut (obecnie średnio: węgiel ~30; ropa ~5; piaski i łupki roponośne ~1,5; gaz ~?, źródła odnawialne $0,8 \div 2$, w przypadku wiatraków tendencja wzrostowa; fuzja jądrowa ~0,65; wodór ~0,8 (nie jest on źródłem energii, a jedynie nośnikiem energii, który trzeba wyprodukować); wg oszacowania własnego autora, dla EJ (rozszczipiania atomów) obecnie ~50, w końcu XXI wieku ~25 (przewidywane zmniejszanie wskutek wzrostu kosztów wykorzystywania coraz uboższych rud uranu i toru).

Wszystkie działania przy energetycznej stopie zwrotu poniżej jedności są pozbawione sensu, bo jest to strata energii. Do działań stymulujących dalszy rozwój cywilizacyjny niezbędne jest tworzenie nowych rozwiązań o możliwie dużych wartościach energetycznej stopy zwrotu. Niezbędne jest szczególnie poszukiwanie alternatywy dla ropopochodnych paliw silnikowych, bo kryzys energetyczny najpierw uderzy w ten niezwykle czuły punkt naszej cywilizacji. Problemu tego nie rozwiąże np. rozwój EJ bazującej na rozszczipianiu atomów, pozwalający tylko na przejściowe opanowanie sytuacji.

⁶ EROEI = E_r / E_i – Energy Returned On Energy Invested – energia zwrócona E_r do zainwestowanej E_i .

Dla kompleksowej oceny zagrożenia globalnym kryzysem energetycznym niezbędne jest łączne oszacowanie wystarczalności wszystkich geopaliw.

Ropa naftowa i gaz

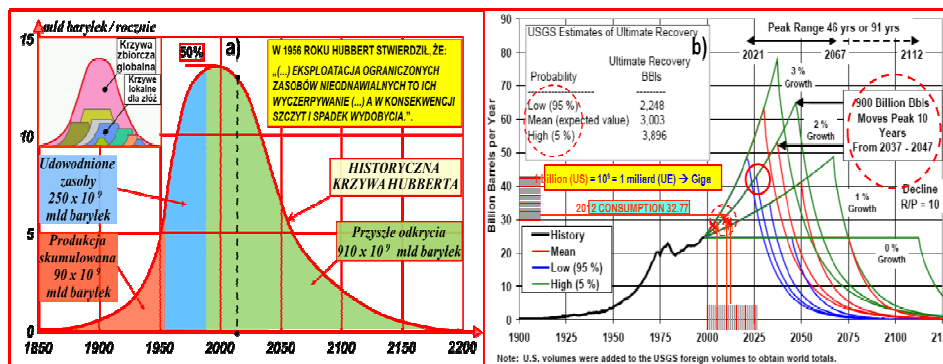
Wyczerpywanie się zasobów ropy naftowej odgrywa szczególną rolę. Ropa jest bowiem najintensywniej wykorzystywanym przez ludzkość źródłem energii pierwotnej oraz tak ważnym surowcem dla gospodarki światowej, że jej niedostatek musi wywołać światowy kryzys gospodarczy. Bardzo ważny jest także gaz.

Ropa naftowa i gaz determinują bezpośrednio produkcję: energii elektrycznej, paliw ciekłych (benzyny, oleju napędowego) i smarów, olejów (opałowych, smarowych, transformatorowych i in.), asfaltów i produktów asfaltowych, rozpuszczalników (benzyn ekstrakcyjnych i lakowych, acetonu i in.), wyrobów parafinowych (parafiny stałej, petrolatum, cerezyny), gazu płynnego (propanu – butanu), tworzyw sztucznych, wielu innych produktów petrochemicznych (polietylenu, propylenu, styrenu, etanolu, alkoholu izopropylowego, chlorowcopochodnych etanu, glikoli, gliceryny, fenolu, n – butanolu, butadienu, izooktanu i in.), nawozów sztucznych, farmaceutyków etc. Nadto ropa naftowa i gaz determinują pośrednio produkcję żywności i wydajność rolnictwa, m. in. poprzez budownictwo drogowe (asfalty), nawozy, transport kołowy i maszyny rolnicze (paliwa). Publicyści podają, że ponad milion wyrobów na świecie pochodzi od ropy!

Problem wystarczalności zasobów najwcześniej został dostrzeżony i właściwie oceniony w przypadku ropy naftowej w USA. W 1956 r. powstała teoria Hubberta – tzw. peak oil⁷ (rys. 4), trafnie przewidująca amerykański kryzys naftowy lat 70. XX wieku, potwierdzona wielokrotnie w dalszych latach w odniesieniu do innych producentów ropy. Suma cząstkowych krzywych Hubberta określonych dla poszczególnych producentów ropy tworzy krzywą globalną (rys. 4a).

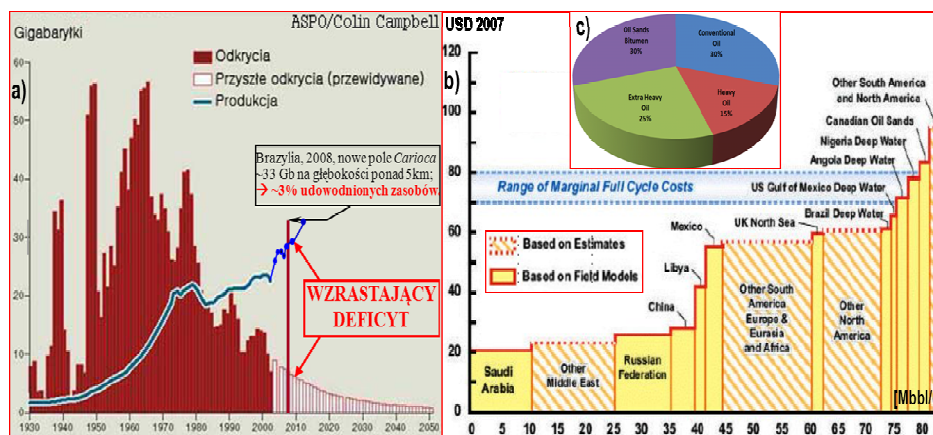
W skali globalnej, maksimum poszczególnych wariantów krzywej Hubberta, sporządzonych dla różnych wskaźników procentowych wzrostu rocznego zapotrzebowania na ropę, odpowiada zużyciu 50% znanych zasobów światowych ropy (rys. 4b). Ropa naftowa występuje w złożach konwencjonalnych (lekkie frakcje) i niekonwencjonalnych (ciężkie frakcje). Postęp technologiczny i wzrost cen ropy umożliwia jej opłacalne wydobywanie z trudno dostępnych źródeł. Udostępniane są nowe jej złoża. Utrudnia to prognozowanie i opóźnia peak oil, ale nie zmienia faktu, że światowe zasoby ropy naftowej są skończone.

⁷ Peak oil (szczyt wydobywania ropy naftowej) – moment odpowiadający zużyciu ok. 50% zasobów ropy w danym złożu, w którym wydobywanie ropy naftowej osiągnie maksimum i rozpocznie się nieodwracalny spadek wydobywania.



Rys. 4. Istota kryzysu geopolitycznego – teoria Hubberta – krzywe dla ropy naftowej: a) historyczna krzywa Hubberta, b) scenariusze światowej produkcji ropy konwencjonalnej wg nowoczesnych prognoz amerykańskich wykorzystujących teorię Hubberta [9, 13]; prognozowany rok wystąpienia peak oil (przy zasobach ropy określonych z prawdopodobieństwem 95%) dla średniorocznego wzrostu produkcji ropy: ~2110 r. dla 0%, ~2035 r. dla 1%, ○ ~2025 r. dla 2%, ~2020 r. dla 3%; × × × – produkcja ropy kolejno w latach: 2005, 2010, 2012 [15]; dane × × × potwierdzają prawidłowość założenia wzrostu ~2%.

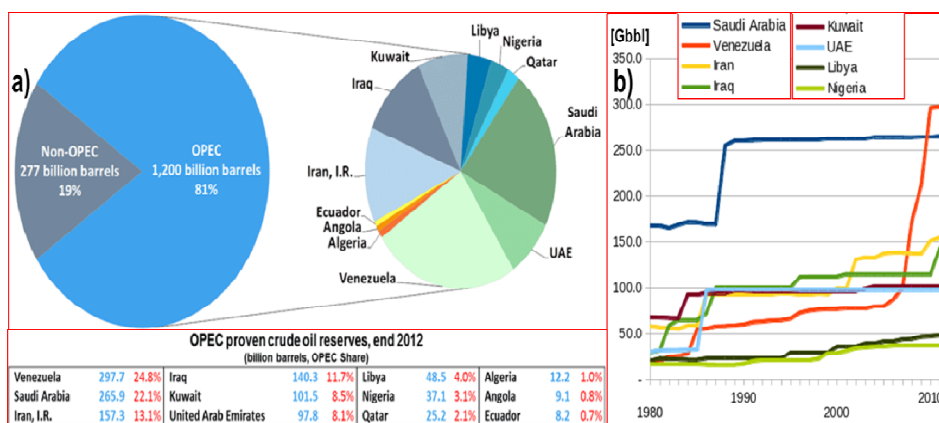
Wirtualny przyrost zasobów ropy aż o 900 mld baryłek (billion am. ≡ mld) opóźnia peak oil zaledwie o 10 lat. Decydujący wpływ na to ma olbrzymie i szybko rosnące tempo zużywania tych zasobów. Objawy kryzysu naftowego są już obecnie wyraźnie widoczne, deficyt ropy szybko wzrasta. Pokazano to na rys. 5.



Rys. 5. Objawy kryzysu naftowego: a) wzrastający deficyt ropy naftowej [9], uzupełnienia własne wg [15] oraz o zasobności złoża Carioca wg [16] (niepotwierdzone); b) struktura kosztów ([USD], kurs wg 2007 r.) skumulowanego zużycia dziennego ([Mbb/d] – megabaryłek/dziennie) ropy naftowej różnego rodzaju, pochodzących z różnych złóż i z różnych źródeł [17]; c) struktura światowych zasobów czterech podstawowych odmian ropy naftowej: ■ – konwencjonalnej, ■ – ciężkiej, ■ – superciężkiej, ■ – z łupków i piasków bitumicznych. Mnożniki UE/PL: M – 10^6 (mega, milion); G – 10^9 (giga, miliard).

Świat zużywa dziennie ok. 86 Mbbl ropy naftowej (rys. 5b). Najłatwiejsza i najtańsza jest eksploatacja złóż konwencjonalnych, ale złoża niekonwencjonalne są ponad dwukrotnie większe (złoża w łupkach i piaskach bitumicznych, głębokowodne, arktyczne etc.). Od 1962 roku zmniejsza się wielkość odkrywanych pól naftowych (rys. 5a). Wykres produkcji przebiega coraz wyżej ponad wykresem odkryć, tj. zasoby coraz szybciej maleją, deficyt wzrasta. Głośne odkrycie w 2008 r. pola Carioca w Brazylii to tylko ok. 3% udowodnionych zasobów ropy, co może pokryć obecne potrzeby świata przez nieco ponad rok.

Nowe zasoby ropy w Wenezueli (bez mała 25% rezerw światowych, wg danych OPEC pokazanych na rys. 6a), po ich udokumentowaniu i udostępnieniu będą zapewne miały w przyszłości większe znaczenie, ale deklarowane przez kraje OPEC posiadane rezerwy ropy naftowej (rys. 6b) często nie zmieniały się przez wiele lat, mimo intensywnego wydobycia oraz braku doniesień o odkrywaniu nowych złóż.



Rys. 6. Rezerwy ropy w wybranych krajach OPEC: a) udziały krajów OPEC w światowych rezerwach ropy w roku 2012 [18]; b) historia deklarowanych przez kraje OPEC rezerw ropy naftowej [15].

Historyczne dane OPEC są dyskusyjne. Pomimo intensywnego wydobycia ropy nie wykazują one spadków wynikających ze wzrastającego deficytu wg rys. 5a. Nadto nie jest dostatecznie uzasadniony gwałtowny wzrost rezerw w połowie lat 80. XX wieku. Sprawa ta stała się przedmiotem dociekań specjalistów⁸ i przedostała się do wiadomości publicznej⁹ [19]. Podali oni, że światowe rezerwy ropy zostały wówczas zawyżone o ok. jedną trzecią przez OPEC z powodu rywalizacji członków kartelu o zdobycie jak największego udziału w rynku, bowiem tzw. kwoty produkcyjne były przyznawane proporcjonalnie do posiadanych rezerw. Statystyki tego nie ujawniają (m.in. koncern British Petroleum; Energy Information Administration EIA z ministerstwa energii USA; Międzynarodowa Agencja ds. Energii MAE; World Oil – publikacja branżowa). MAE

⁸ Prof. David King z zespołem, Oksford, były doradca rządu UK ds. nauki – raport dot. rezerw ropy.

⁹ PAP, za dodatkiem biznesowym „Daily Telegraph”.

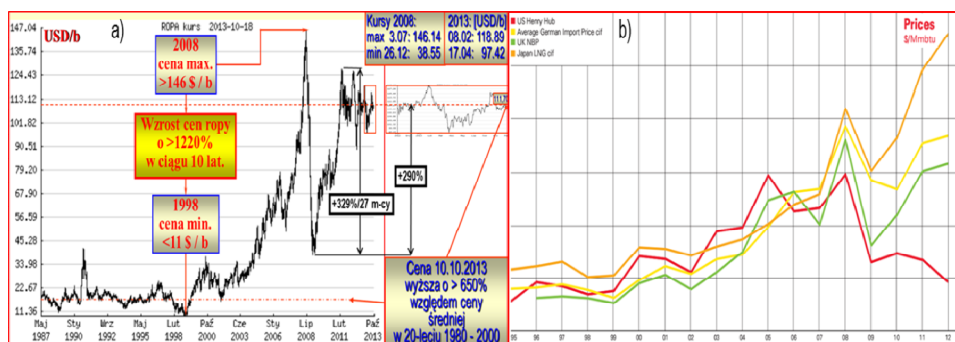
uchyliła się od ustosunkowania się do tych zarzutów. MAE utrzymuje się z opłat członków, którymi są światowe koncerny energetyczne.

Według Kinga, konwencjonalne rezerwy ropy należy obniżyć z 1150-1350 mld baryłek do 800 - 950 mld baryłek, już w najbliższych latach grozi niedobór paliw i wzrost cen na rynku, popyt znacznie przewyższać podaż już w latach 2014-15. Podobne informacje podają też inne źródła [12, 39].

Być może, jest to afera wszech czasów, a peak oil jest bliżej, niż przewidują prognozy.

W 1980 roku udokumentowane światowe rezerwy ropy naftowej oceniano na 683 mld baryłek. Przy wydobyciu na poziomie 23 mld baryłek rocznie zapewniało to wówczas wystarczalność (przypis⁵) r/p bez mała 30 lat. W latach 1980 ÷ 2012 roku wydobyto ok. 852 mld baryłek, roczne wydobycie wzrosło do 31,5 mld baryłek, a udokumentowane rezerwy (łącznie z Wenezuelą) wzrosły do 1668 mld baryłek. Wystarczalność r/p jest oceniana obecnie na ok. 53 lata [15]. Tymczasem amerykańska Energy Information Administration prognozuje, że popyt na ropę będzie dalej wzrastał, a dzienne wydobycie przekroczy 100 milionów baryłek¹⁰ do 2030 roku [20].

54 spośród 65 państw - producentów ropy przekroczyły peak oil lub są właśnie w fazie szczytu wydobycia. Na każdych sześć zużytych baryłek ropy przypada jedna odkryta. Proporcja ta pogarsza się z upływem czasu. Światowe wydobycie ropy już jest i będzie stopniowo coraz droższe, tak finansowo, jak i energetycznie [21, 22]. Niezależnie od krótkookresowych wahań, po załamaniu z 2008 r. cena ropy szybko znacznie wzrosła i utrzymuje się na wysokim poziomie (rys. 7), gazu podobnie (wyjąwszy USA).



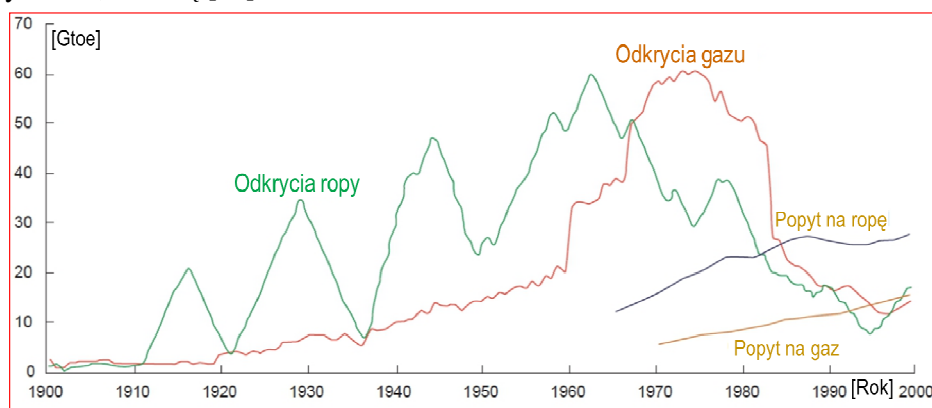
Rys. 7. Ceny ropy i gazu: a) zmiany cen ropy [USD/bbl] w latach 1987 ÷ 2013; b) zmiany cen gazu [USD/Mmbtu]¹¹ w wybranych krajach w latach 1995 ÷ 2012. [15, 23]

¹⁰ 100 Mbb/d \equiv 36,5 Gbbl/a (mld baryłek rocznie).

¹¹ 1 Mmbtu (megabtu) = 1000000 btu = 1,055056 GJ. BTU (btu) – British Thermal Unit – jednostka energii (głównie w USA). MBTU (mbtu) zdefiniowano jako tysiąc BTU (wg numeracji rzymskiej M \equiv 10³, tysiąc), co myli się z jednostkami układu SI (k, kilo \equiv 10³, tysiąc; M, mega \equiv 10⁶, milion). Dla uniknięcia błędów, dla miliona BTU używa się zapisów Mmbtu (MMBTU).

Obecna rynkowa cena gazu amerykańskiego zależy m. in. od kosztów eksploatacji gazu łupkowego i kształtuje się na poziomie ok. 130 USD/1000 m³, a eksport gazu będzie zapewne możliwy za kilka lat. Cena amerykańska musi być zwiększona o koszty skraplania i transportu oraz koszty „strategii” amerykańskich firm eksportujących gaz. Zgodnie z prognozą EIA [24] cena gazu będzie się utrzymywała poniżej 178 USD/1000 m³ do 2023 r., po czym wzrośnie do poziomu 233 USD/1000 m³ w 2035 r. Wobec konkurencji ze strony amerykańskiego eksportu, można oczekiwać presji na obniżkę światowych cen gazu. Cena sprzedaży amerykańskiego gazu w Europie będzie determinowała opłacalność produkcji polskiego gazu łupkowego, gdyż LNG będzie dla Polski dostępny w ilościach wystarczających do uzupełnienia importu gazu wynikającego z długoterminowych kontraktów¹² oraz krajowej produkcji gazu konwencjonalnego. Przy założeniu dostatecznej wartości EROEI > 1, gdyby polski gaz łupkowy był droższy od LNG, jego produkcja nie miałaby sensu ekonomicznego [25].

Jak wynika z rys. 8, historię wielkich odkryć ropy i gazu mamy, jak dotychczas, za sobą [39].



Rys. 8. Wiek XX: 100 lat historii odkryć ropy naftowej i gazu oraz wzrost popytu w ostatnim 30-leciu.

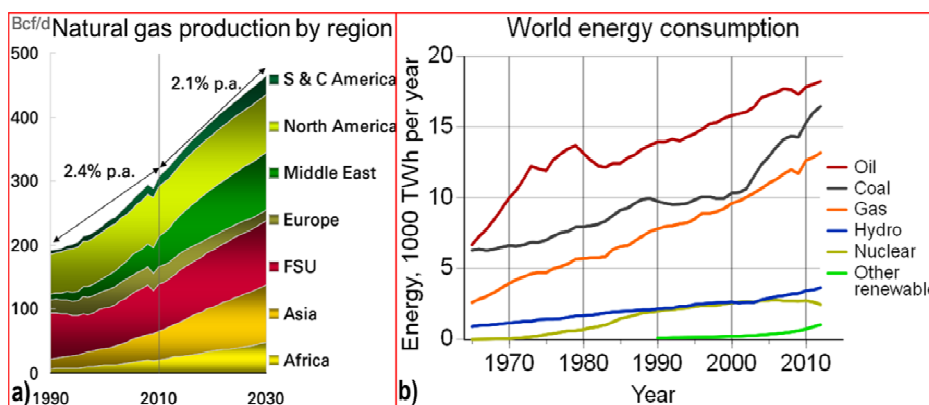
Wg EIA [40, 41] (różnice danych; przyjęto wg 2013 r.) mamy na świecie (bez USA) 131 formacji łupków ropo- i gazonośnych w 41 krajach. Nieudokumentowane zasoby gazu łupkowego wynoszą 7,2 Tcf, a ropy 345 Gbbl¹³ (udziały w zasobach światowych odpowiednio: gazu 32% i ropy 10%).

Postęp w dziedzinie ropy i gazu z łupków nie zmienia więc istoty problemu ich wystarczalności.

¹² Polska do 2030 r. ma kontrakt z Gazpromem i ustalone ceny zakupu gazu. Według nieoficjalnych źródeł, do 2012 r. cena wynosiła 550 USD/1000 m³, a po obniżce przez Rosję o 10%, od 2013 r. jest na poziomie 495 USD. Dostawy LNG z Kataru od 2015 r. zakontraktowano po cenie ok. 500 USD. Cena gazu wydobywanego w Polsce wynosi około 170 USD.

¹³ Jednostki USA/UE: 1 trillion cubic feet = 10¹² stóp³ (bilion, tera) = 1 Tcf; 1 billion barrels = 10⁹ baryłek (miliard, giga) = 1 Gbbl.

Na świecie produkcja gazu wzrasta, średnioroczny jej przyrost wynosił 2,4% w dwudziestolecie 1990-2010, nieco mniejszy (2,1%) jest prognozowany w latach 2010-2030 (rys. 9a).



Rys. 9. Gaz na świecie: a) struktura regionalna produkcji gazu [Bcf/d]¹⁴ – historia i prognoza w latach 1990-2030 [8]; b) roczne zużycie energii [TWh/r] z gazu i innych źródeł, w latach 1965-2012 [38].

Dostępne źródła [21, 22] podają, że w odniesieniu do gazu naturalnego efekt peak gas wystąpi z ok. dziesięcioletnim opóźnieniem w stosunku do peak oil. Trudnościom z tym związanym będzie towarzyszył przyspieszony wzrost zależności naszej cywilizacji technicznej od innych źródeł energii pierwotnej. Krzywe na rys. 9b pokazują, że w latach 1965-2012 średni przyrost rocznego zużycia energii, pochodzącej z różnych źródeł, był w miarę zbliżony w przypadkach ropy ($E_{r2012}/E_{r1965} = 2,77$) oraz węgla ($E_{w2012}/E_{w1965} = 2,62$), natomiast był bez mała dwukrotnie szybszy w przypadku gazu ($E_{g2012}/E_{g1965} = 5,12$). Należy zauważyć, że początkowo, w dekadzie 1965 ÷ 1975, bardzo szybki był wzrost zużycia ropy ($E_{r1975}/E_{r1965} = 1,82$), w stosunku do węgla (1,06) i gazu (1,04), natomiast w końcowej dekadzie 2002 ÷ 2012 szybkość zużywania węgla gwałtownie wzrosła ($E_{w2012}/E_{w2002} = 1,56$) w stosunku do gazu ($E_{g2012}/E_{g2002} = 1,33$) oraz ropy ($E_{r2012}/E_{r2002} = 1,14$).

Tabela 2. Przyrosty $\Delta E_{r\%}$ rocznego zużycia energii z trzech głównych geopaliw [%] ¹⁵ (rys 9b)			
Lata; n	1965 ÷ 1975 n=10	1965 ÷ 2012 n = 47	2002 ÷ 2012 n = 10
Ropa	8,2%	3,8%	1,4% (↓↓6×)
Węgiel	1,1%	3,5%	5,6% (↑↑5×)
Gaz	8,5%	8,8%	3,3% (↓↓2,5×)

¹⁴ Bcf/d – billion (amer. ≡ 10⁹) cubic feet/daily ≡ miliard stóp sześciennych dziennie. 1Bcf = 0,028 mld m³.

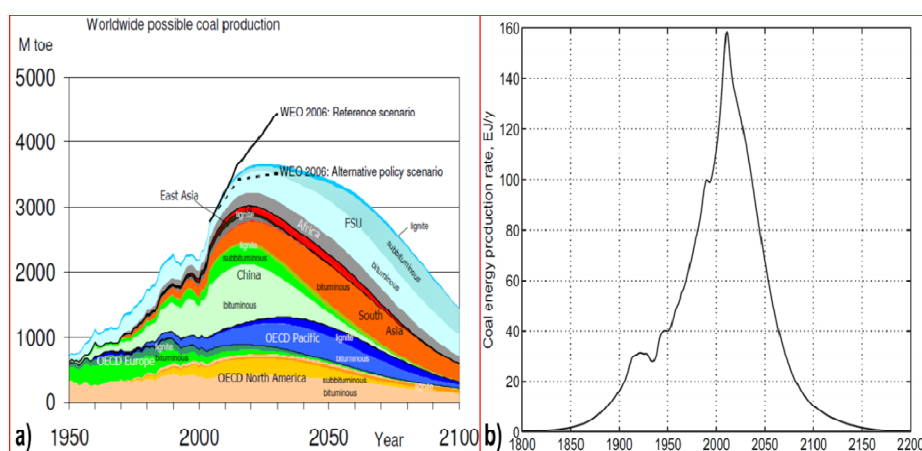
¹⁵ [%]_i – procent liniowy: $\Delta E_{r\%} = \{(E_k - E_p)/E_p\} \times 100/n$ [%], gdzie: E_p – zużycie energii w roku początkowym r_p, E_k – zużycie energii w roku końcowym, n = r_k - r_p – liczba lat analizowanego okresu.

Średnioroczne wskaźniki procentowe wzrostu rocznego zużycia energii w latach 1965-2012 (rys. 9b) zostały zestawione w tabeli 2, dla całego okresu oraz jego pierwszej i ostatniej dekady. Nadto pokazano tendencje oraz krotności zmian wskaźników w ostatniej dekadzie w stosunku do pierwszej.

Niezależnie od przejściowych wahań, tendencje są jednoznaczne: szybkość wzrostu zużywania ropy zmniejsza się zdecydowanie, gazu również – ale dużo wolniej, a węgla zdecydowanie rośnie.

Węgiel

Oszacowanie wystarczalności zasobów ropy i gazu ukazuje tylko część problemu, bowiem węgiel najwyraźniej już obecnie zaczyna odgrywać coraz większą rolę jako światowe źródło energii pierwotnej. Wg analizy wielu opracowań, zawartej w [39], prognozy są utrudnione wskutek możliwości zawyżania wielkości zasobów węgla, podobnie jak w przypadku ropy [19]. Wówczas szczyt globalnej produkcji węgla może wystąpić już w latach 2011 ÷ 2025 (rys. 10).



Rys. 10. Węgiel na świecie: a) historia i prognozowane scenariusze produkcji węgla (w [Mtoe])¹⁶ w latach 1950-2100; b) model peak coal (wg teorii Hubberta), obejmujący produkcję (w [EJ/r]) wszystkich rodzajów węgla na całym świecie w latach 1800-2200 [39].

Wartość energetyczna szczytowej produkcji węgla jest szacowana na ok. 160 EJ rocznie. Według danych z roku 2012, można oczekiwać wzrostu produkcji węgla przez ok. 1-2 dekady oraz osiągnięcia szczytu produkcji w latach 2020-2030. Należy zauważyć, że podobnie jak w przypadku ropy naftowej (rys. 4b), nawet jeśli globalne zasoby węgla byłyby 2 razy większe niż podano, efekt peak coal byłby opóźniony tylko do lat 2030-2050.

¹⁶ Mtoe – megatona ekwiwalentu ropy; 1 Mtoe = 1 milion toe (mega, 10⁶); 1 toe = 42 GJ = 12 MWh.

Uran

Obecny poziom rozwoju energetyki jądrowej EJ również nie pozwala spokojnie patrzeć w przyszłość, chociaż zamierzenia wielu krajów wskazują na przyspieszenie rozwoju w tej dziedzinie.

Dotyczy to nie tylko konwencjonalnych elektrowni jądrowych, wykorzystujących energię rozszczepienia atomów w dotychczas stosowanym cyklu paliwowym otwartym CPO, umożliwiającym wykorzystanie jedynie bardzo małej części energii paliwa jądrowego (ok. 0,7%; w najnowocześniejszych reaktorach 2-3%), ale także znacznie bardziej wydajnych prędkich reaktorów powielających, umożliwiających wielokrotnie efektywniejsze (realnie w ok. 60-70%, a jak twierdzą skrajni optymiści prawie w 100%) wykorzystanie zasobów uranu oraz toru w cyklu paliwowym zamkniętym CPZ z wielokrotnym recyklingiem paliwa. Możliwie szybkie opanowanie i upowszechnienie tej ostatniej technologii jest realną drogą do istotnego wydłużenia okresu łącznej wystarczalności dotychczas wykorzystywanych geopaliw, co zwiększa szanse znalezienia nowych rozwiązań dla pokonania globalnego kryzysu energetycznego. Ziemskie zasoby uranu i toru są jednak nieodnawialne, a więc mają ograniczoną wystarczalność. Wokół tej problematyki narosło wyjątkowo wiele mitów. Panuje fałszywe przekonanie, że zasoby uranu w ziemi i w wodzie morskiej wystarczą na tysiące lat.

Technologia produkcji uranu jest skomplikowana i zależy od zawartości uranu w różnych złożach, pokazanej w tabeli 3.

Tabela 3. Zawartości uranu w różnych rodzajach złóż. Dane wg [42]			
Rodzaj złoża	Zawartość uranu	Rodzaj złoża	Zawartość uranu
Bardzo bogate, 20 %	U 200 000 ppm / 200 kg/t	Granity	U 4÷5 ppm / 0,004 kg/t
Bogate, 2% U	U 20 000 ppm / 20 kg/t	Skały osadowe	U 2 ppm / 0,002 kg/t
Ubogie, 0,1% U	U 1 000 ppm / 1 kg/t	Skorupa ziem-ska	U 2,8 ppm / 0,003 kg/t
Bardzo ubogie, 0,01% U	U 100 ppm / 0,1 kg/t	Wody morskie	U 0,0003 ppm / 0,000003 kg/t

Uran na świecie występuje powszechnie i jest go rzeczywiście dużo, ale jest bardzo rozproszony. Do rzadkości należą złoża o koncentracji większej od 500 g czystego uranu na tonę skał, co obecnie uważa się za granicę opłacalności wydobycia. Niezależnie od ekonomicznych aspektów gospodarki uranem, podstawowym kryterium sensowności eksploatacji danego złoża jest energetyczna stopa zwrotu, $EROEI > 1$ (przypis ⁸). Jest ona tym mniejsza, im mniejsza jest zawartość uranu w podłożu uranonośnym oraz im jest ono twardsze, czemu towarzyszy wzrost kosztów wydobycia i przetwarzania uranu.

Jeśli zawartość uranu w skałach lub piaskach jest uboga (tj. poniżej 1000 ppm), ale powyżej tzw. bariery mineralogicznej¹⁷, musi on być w postaci łatwo

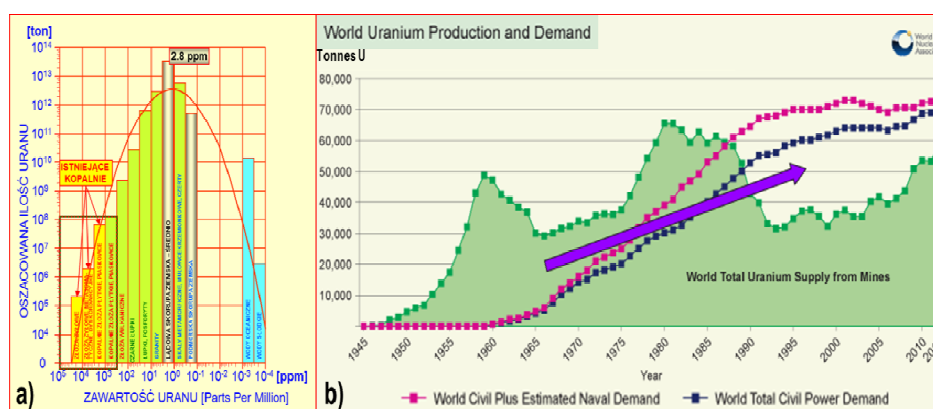
¹⁷ Bariera mineralogiczna – graniczna koncentracja uranu (ok. 100 ppm – 0,01% [45]) determinująca strukturę złoża.

i tanio dającej się wydzielać z podłoża. Dzięki temu zakłada się, że wydobycie uranu będzie ekonomiczne. Typowa ruda uranu to wielka ilość skał krzemianowych zawierających niewielką ilość ziaren minerału uranowego. Wydobycie uranu polega wówczas na rozkruszeniu skały i ekstrakcji minerału uranowego poprzez jego rozpuszczanie kwasem siarkowym lub ługiem węglanowo-sodowym. Przy koncentracji poniżej bariery mineralogicznej uran jest rozproszony w całej masie skały, zazwyczaj twardej (tzw. stały roztwór uranu w skałe; skały fosforanowe i granity). Dla ekstrakcji uranu trzeba wówczas zamienić w roztwór całą masę skały. Poniżej bariery mineralogicznej konieczne nakłady materiałowe i energetyczne rosną 10-100 razy [45].

Za graniczną wartość koncentracji uranu, poniżej której eksploatacja złoża jest energetycznie nieefektywna (EROEI < 1), uznaje się obecnie ok. 200 ppm.

Według opinii autora, postęp techniczny powinien pozwolić na obniżenie tej wartości granicznej do bariery mineralogicznej, tj. na udostępnianie złóż o minimalnej koncentracji uranu ok. 100 ppm.

Rozmieszczenie zasobów uranu na Ziemi [43] oraz jego produkcja i zapotrzebowanie [44] zostały pokazane na rys. 11.



Rys. 11. Uran na Ziemi: a) ilość i koncentracja uranu w różnych typach złóż lądowych i podmorskich oraz w wodach oceanicznych [43]; b) uran w latach 1945 ÷ 2012: światowe zapotrzebowanie: ■ – do celów cywilnych, ■ – całkowite (cywilne oraz dla marynarki); ■ – światowa produkcja roczna [44].

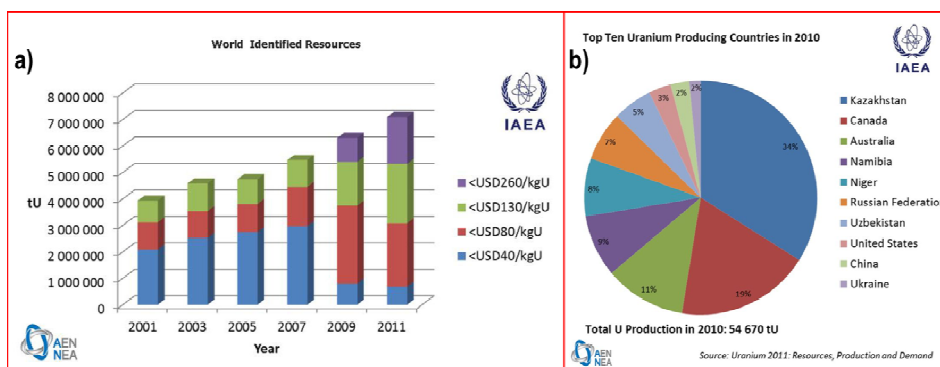
➡ Deficyt (wg WNA) pokrywany był z pozostałych źródeł (malejące zapasy cywilne i zapasy wojskowe związane z redukcją broni jądrowej, pluton i uran z przerobu wypalonego paliwa¹⁸).

Obecne zapotrzebowanie jest zaspokajane głównie bieżącym wydobyciem (85% w 2011 r.).

W dekadzie lat 2001-2011 rozpoznane zasoby uranu wzrosły w przybliżeniu o 85%. Według najnowszego wydania tzw. Czerwonej Księgi (2011 r.) [46], zasoby uranu w cenie do 130 dolarów za kg wynoszą obecnie 5,3 mln ton, a wliczając zasoby w cenie do 260 dolarów za kilogram przekraczają 7 mln ton.

¹⁸ Tzw. paliwo MOX.

Przyrost zasobów uranu i czołówkę 10 jego największych producentów pokazano na rys. 12.



Rys. 12. Uran na Ziemi: a) przyrost zasobów uranu w dekadzie lat 2001 ÷ 2011; b) czołowa dziesiątka krajów produkujących uran [46].

Z rys. 12a) wynika, że tani uran się kończy (zmniejszenie zasobów o cenie < USD80/kgU o ponad 35% od 2007 r.), tj. sięgać trzeba do złóż coraz uboższych. Prawie 60% zasobów jest dostępne w dwóch najwyższych kategoriach cenowych. Zapewne oznacza to także zmniejszanie się EROEI, o czym się nie wspomina. Prognozowany jest duży wzrost światowego popytu rocznego na uran, wg IAEA od poziomu 63 875 ton uranu metalicznego (TU) w 2010 roku, do poziomu między 98 000 a 136 000 TU w 2035 r. Na rys. 11b) tendencja ta nie jest jednak widoczna. Prognoza tak dużego wzrostu popytu może wynikać ze znanych planów rozwojowych EJ, obejmujących budowę do 2020 r. 251 reaktorów (w tym w Chinach 68, Indiach 31, Rosji 29 i USA 24), o łącznej mocy 211 GWe. W stosunku do roku 2006 (442 reaktory, 371 GWe) oznacza to wzrost o 57% [26].

W latach 2008-2010 wzrost zasobów uranu osiągnięto dzięki zwiększeniu o ok. 22% nakładów na jego poszukiwania i budowę kopalni (ponad 2 mld USD w 2010 r.). Wydobywanie uranu wzrosło w tych latach o ponad 25% z powodu zwiększenia produkcji w Kazachstanie. Polskie złoża rudy uranowej MAEA oszacowała w 2008 r. na ok. 100 tys. ton, w tym 7270 ton w pokładach rozpoznanych, o koncentracji uranu 250 ÷ 1100 ppm.

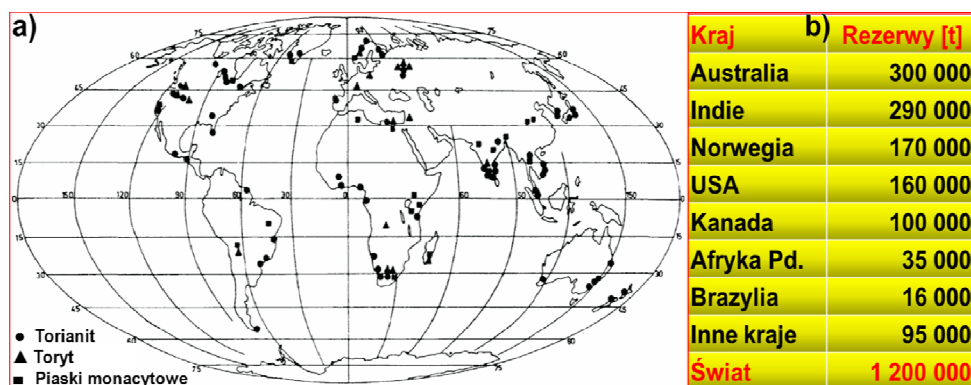
IAEA w kolejnych wydaniach Czerwonej Księgi i innych materiałach podaje zróżnicowane okresy wystarczalności uranu, szacowane zazwyczaj metodą r/p dla aktualnego popytu i przeważającej dziś technologii reaktorów LWR z otwartym cyklem paliwowym oraz dla zmieniających się rezerw (udokumentowanych) i zasobów (nieudokumentowanych) uranu. Przykładowo w 2007 r. IAEA oceniała rezerwy na ok. 5,5 Mt U (wystarczalność na ok. 80 lat), a WNA [35] zasoby na dodatkowe 10,5 Mt U (na ok. 200 lat), tj. razem ok. 16 Mt U (na ok. 280 lat). Oceniane w 2011 r. rezerwy 7 Mt U (rys. 12a) wystarczą na 100 lat, a

razem z prognozowanymi konwencjonalnymi zasobami uranu – na ok. 300 lat¹⁹ [46]. Oznacza to, że przy tylko pięciokrotnym zwiększeniu mocy elektrowni jądrowych uranu wystarczyłoby zaledwie na 20 ÷ 60 lat. To bardzo krótki okres.

Z drugiej strony zwolennicy rozwoju EJ, często bezkrytycznie, szafują stwierdzeniami o wielkiej wystarczalności zasobów uranu. Przykładowo, przy wykorzystaniu zasobów niekonwencjonalnych, jak fosforyty, wystarczalność uranu wynosiłaby 1700 lat [47]. Niestety zwolennicy EJ w praktyce pomijają sprawę EROEI w przypadku takich zasobów. Koncentracja uranu w fosforytach jest rzędu 10-30 ppm (rys. 11a), tzn. jest kilkakrotnie mniejsza od bariery mineralogicznej. Trudno wówczas oczekiwać wartości EROEI > 1, podobnie jak w przypadku wód oceanicznych o koncentracji uranu mniejszej od 0,001 ppm. W miarę wykorzystywania złóż wysokiej jakości, ceny uranu będą wzrastać do granicy opłacalności, przy czym nieprzekraczalną barierą energetyczną pozostaje zawsze EROEI = 1.

Istotnym czynnikiem wydłużającym okres wystarczalności paliw jądrowych jest wykorzystanie światowych zasobów toru w cyklu uranowo-torowym U - Th. Możliwości tej techniki opisane są w [48].

Światowe zasoby toru pokazano na rys. 13.



Rys. 13. Tor na świecie: a) rozmieszczenie głównych rodzajów złóż wg IAEA, 2000 r. [48]; b) ekonomicznie wydobywalne zasoby toru (dane wg USGS z 1999 r., opr. własne).

Możliwości energetyczne tej techniki wydają się znakomite. Wg [48], do wytworzenia 1 TWh w reaktorach wodnych potrzeba 20-25 ton uranu naturalnego, a w cyklu uranowo-torowym, w reaktorach na stopionych solach uranu i toru z bieżącym oczyszczaniem paliwa z produktów rozszczepienia, potrzeba tylko 50 kg toru i 50 kg uranu naturalnego. Technika ta ma wiele innych zalet, ale cykl U – Th stwarza też wiele trudności technicznych. Obecny stan wiedzy nie gwarantuje dostatecznie precyzyjnych danych, umożliwiających właściwe zaprojektowanie reaktora o cyklu U – Th.

¹⁹ Te dane są w przybliżeniu zgodne, oznaczają udokumentowanie części zasobów, około 1,5 Mt i przeniesienie ich do rezerw.

Dotychczas ta technologia jest w stadium eksperymentalnym i nie wykorzystuje się toru w działających reaktorach energetycznych. Dlatego popyt na tor jest mały i jego zasoby są słabo zbadane.

W wielu źródłach powtarzane są poglądy, że toru na świecie jest dużo więcej niż uranu. Rzeczywiście, średnia koncentracja toru w skorupie ziemskiej jest oceniana na 7,2 ppm, natomiast uranu na 2,8 ppm (rys. 11a), tj. toru mamy ponad 2,5-krotnie więcej (wg MAEA 4,5 Mt Th w r. 2005).

Postęp w tej dziedzinie, zahamowany zapewne przejściowo²⁰ katastrofą w Czarnobylu, może spowodować zwiększenie światowego popytu na tor, co z kolei może doprowadzić do kilkukrotnego zwiększenia ilości jego rozpoznanych zasobów. Nie oznacza to jednak analogicznego wzrostu możliwości ich wykorzystania. Tor, ściślej izotop Th232, nie jest materiałem rozszczepialnym. W cyklu U-Th jest tzw. materiałem paliworodnym, przetwarzanym w kolejnych reakcjach jądrowych pod działaniem strumieni neutronów na rozszczepialny U233 [48]. Dla prowadzenia tych reakcji muszą być zachowane właściwe proporcje uranu i toru w paliwie reaktorowym. Bez uranu nie ma cyklu U-Th. Tyle toru da się wykorzystać, na ile pozwolą wyczerpujące się zasoby uranu.

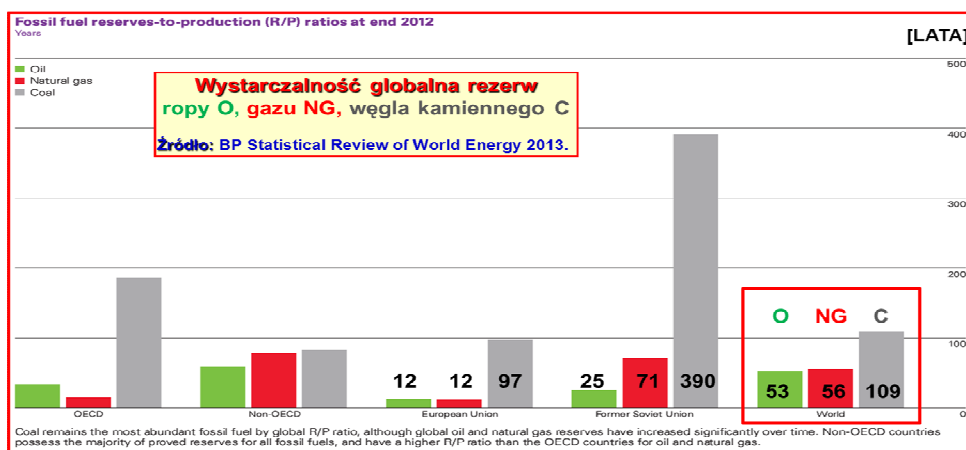
Przewidywane upowszechnienie prędkich reaktorów powielających o zamkniętym cyklu paliwowym CPZ z wielokrotnym recyklingiem uranu oraz aktywności z wypalonego paliwa jądrowego, w połączeniu z wykorzystaniem toru, niewątpliwie wydłuży okres wystarczalności zasobów uranu, a więc i toru. Na temat koncentracji toru w różnych złożach, opłacalności jego wydobywania, EROEI etc. brak dostatecznie precyzyjnych danych w dostępnej literaturze. Dlatego przy oszacowaniu okresu wystarczalności zasobów surowców kopalnych, niezbędnych do wytwarzania rozszczepialnych paliw reaktorowych, będą brane pod uwagę w przypadku toru dane, jak dla uranu. W praktyce sprowadza się to orientacyjnie do przyjęcia założenia podwojenia wydobywalnych zasobów uranu o $EROEI > 1$.

Warto zauważyć, że radykalni zwolennicy rozwoju EJ często zaciemniają bilans energetyczny, wliczając do niego wytworzoną energię termiczną i pomijając jej realne wykorzystywanie, podczas gdy w pełni wykorzystywana jest tylko energia elektryczna, wytwarzana na poziomie 1/3 energii termicznej.

Wystarczalność globalna

Na rys. 14 pokazano wyniki odrębnego oszacowania metodą R/P wystarczalności globalnej każdego z trzech podstawowych geopaliw: ropy, gazu i węgla.

²⁰ Badania w tym zakresie są intensywnie prowadzone w Indiach, mających duże zasoby toru.



Rys. 14. Wystarczalność globalna zasobów węgla kamiennego C (109 lat), ropy O (53 lata) i gazu ziemnego NG (56 lat). Źródło danych [15]/2013, opisy dodatkowe własne.

Dane z rys. 14 dotyczą rezerw udokumentowanych wg procedur BPSR [15]. W skali globalnej węgiel pozostaje nadal najbardziej obfitym źródłem energii pierwotnej spośród wszystkich paliw kopalnych, mającym najdłuższy okres wystarczalności R/P, pomimo ostatnio odnotowanego wzrostu rezerw ropy naftowej i gazu ziemnego. Charakterystyczne jest, że kraje spoza OECD (przy- pis ³) posiadają relatywnie duże rezerwy (udokumentowane) wszystkich paliw kopalnych w stosunku do krajów OECD, a także mają obecnie najdłuższe okresy wystarczalności R/P dla ropy naftowej i gazu ziemnego. Szczególnie trudna jest sytuacja Unii Europejskiej, będącej trzecim na świecie (po Chinach – 21,9% i USA – 17,7%) konsumentem energii pierwotnej (13,4%). UE funkcjonuje w stanie ciągłego zagrożenia utratą stabilności dostaw ropy i gazu ze źródeł zewnętrznych. Dlatego zwiększenie bezpieczeństwa i dywersyfikacja tych dostaw jest głównym celem unijnej polityki energetycznej, która jest zarazem silnie uzależniona od unijnej polityki ochrony środowiska, w tym polityki klimatycznej. W tym zakresie UE w stosunku do państw członkowskich prowadzi unikatową w skali świata politykę restrykcyjnego wymuszania (vide protokół z Kioto, zasady handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych, redukcja emisji CO₂, zaporowe wymagania środowiskowe dla gazu łupkowego) działań skądinąd słuszych, ale kosztownych i nie zawsze jednoznacznie uzasadnionych (jak np. wpływ zawartości CO₂ na efekt cieplarniany). Powoduje to wzrost cen energii elektrycznej w UE²¹, zarazem pogarszający konkurencyjność firm europejskich na rynkach światowych²² i stymulujący wzrost importu tańszych surowców energetycznych, czyli wzrost uzależnienia od zewnętrznych źródeł tych

²¹ Przykładowo wg MAE, od 2005 r., ceny te w UE wzrosły o ok. 37%, a w USA zmalały o ok. 4%.

²² Według wypowiedzi Przewodniczącego Rady Europejskiej H. Van Rompuy, po zakończeniu szczytu UE z maja 2013 r., w USA energia dla przemysłu jest cztery razy tańsza dzięki eksploatacji złóż gazu łupkowego.

surowców. Najwięksi emitenci gazów cieplarnianych (Chiny 29% i USA 16%) niezbyt tym się przejmują, a wysiłki UE w skali globalnej są mało znaczące²³. Polityka taka jest jednak szczególnie dotkliwa dla Polski.

Geopaliwa w Polsce

Polskie rezerwy geopaliw (bez ropy i gazu łupkowego), ich roczną produkcję i zużycie na tle rezerw sąsiadów i świata, a także ich wystarczalności, pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. Geopaliwa i ich wystarczalności w Polsce, Unii Europejskiej, FSU i na świecie.

GAZ 2012	PRODUKCJA P			ZUŻYCIE Z			REZERWY R		R/P R/Z
	[bil. m ³]	2012/2011	Udział	[bil. m ³]	2012/2011	Udział	[tril. m ³]	Udział	
BP Statistical Review of World Energy 2013									[lat]
RP	4,2	-1,1%	0,1%	16,6	+5,1%	0,5%	0,1	0,1%	28,3 7,1
UE	149,6	-5,5%	4,4%	443,9	-2,3%	13,4%	1,7	0,9%	11,7 3,9
FSU	767,7	-1,4%	22,8%	584,9	-2,6%	17,6%	54,5	29,1	71,0 93,2
ŚWIAT	3363,9	+1,9%	100%	3314,4	+2,2%	100%	187,3	100%	55,7 56,5
Ropa 2012	[Mt]	2012/2011	Udział	[Mt]	2012/2011	Udział	[Gt]	Udział	[lat]
RP	0,5**	+5,1%**	0,01%	25,1	-5,5%	0,6%	0,0216	0,001%	43,2 0,9
UE	73,0	-9,9%	1,8%	611,3	-4,6%	14,8%	0,9	0,4%	12,1 1,5
FSU	670,9	0,4%	16,3%	205,9	+2,9%	5%	17,1	7,5%	25,2 83,1
ŚWIAT	4118,9	+2,2%	100%	4130,5	+0,9%	100%	235,8	100%	52,9 57,1
Węgiel 2012	[Mt]*	2012/2011	Udział	[Mt]*	2012/2011	Udział	[Mt]	Udział	[lat]
RP	119,1	+3,6%	1,5%	110,2	-4,0%	1,4%	5709	0,7%	40 51,8
UE	336,8	-0,2	4,3%	599,2	+3,4%	7,9%	56148	6,5%	97 93,7
FSU	568,3	+5,3%	7,2%	367,6	+2,2%	4,8%	228034	26,5%	390 620
ŚWIAT	7844,4	+2,0%	100%	7609,4	+2,5	100%	860938	100%	109 113

Jednostki: USA → 1 bil. (billion) = 10⁹ = 1 mld (miliard) → PL || USA → 1 tril. (trillion) = 10¹² = 1 bln (billion) → PL
 1 [Mt]* = 0,49 [Mtoe]. Dane [15] dla węgla podano w [toe]; przeliczniki: 1toe = 1,5 tk (w. kamienny) = 3 tb (w. brunatny); średni przelicznik oszacowano dla łącznych zasobów węgla, uwzględniając udziały węgla kamiennego i brunatnego w tych zasobach.
 ** Dane wg PGNiG [51]. FSU (Former Soviet Union) Rosyjska Federacja i 12 krajów d. ZSRR, uwzględnianych w statystykach [15].

W tabeli 4 wykorzystane zostały dane wg [15], przy czym brakujące dane dotyczące polskiej produkcji ropy naftowej zostały uzupełnione wg [51], zaś dane dla węgla, wymagające sprowadzenia do wspólnych jednostek obliczeniowych, zostały przetworzone i uśrednione w typowy sposób przy wykorzystaniu

²³ Udział UE w emisji globalnej to ok. 11%, więc obecne zmniejszenie emisji w skali UE aż o 18,5 %, to globalnie tylko 2%.

standardowych równoważników kalorycznych i współczynników przeliczeniowych jednostek miar i wag powszechnie używanych dla różnych geopaliw [15].

W tabeli 4 podano wg [15] okresy wystarczalności geopaliw określone metodą r/p. Są one m.in. dla Polski (z wyjątkiem węgla) nierealnie długie ze względu na mały udział produkcji własnej w stosunku do importu. Dla pokazania pełnego obrazu sytuacji podane zostały wyniki alternatywnego oszacowania okresów wystarczalności metodą R/Z (rezerwy do zużycia rocznego). Odpowiada to konieczności zaspokojenia z własnych źródeł krajowego zapotrzebowania na geopaliwa, w sytuacji kryzysowej skutkującej niedostępnością geopaliw ze źródeł zewnętrznych. To jest bardzo ważny wskaźnik bezpieczeństwa energetycznego kraju.

Polska jest krajem ubogim pod względem surowców energetycznych. Nie ma zasobów geopaliw wystarczających dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego. Zasoby konwencjonalne ropy i uranu są zbyt małe, by pokazywały je statystyki światowe. Ropa i gaz z łupków, w sensie strategicznym, niewiele poprawią sytuację.

Łączne zasoby wydobywalne ropy naftowej z formacji łupkowych w Polsce są oceniane na 215-268 milionów ton. Mogą być 8,5-10,5 razy większe od udokumentowanych zasobów ze złóż konwencjonalnych (ok. 26 mln ton). Przy rocznym zapotrzebowaniu na ropę ok. 24 mln ton, razem z zasobami konwencjonalnymi, daje to wystarczalność (metodą r/p) w przedziale 10-12 lat [50].

Łączne zasoby wydobywalne gazu ziemnego z formacji łupkowych w Polsce są oceniane na 346-768 miliardów m³. Mogą być 2,5-5,5 razy większe od udokumentowanych zasobów ze złóż konwencjonalnych (ok. 145 mld m³). Przy rocznym zapotrzebowaniu na gaz ziemny ok. 14,5 mld m³, daje to wystarczalność (metodą r/p) w przedziale 35-65 lat. [50].

Wśród cytowanych danych źródłowych pochodzenia krajowego i zagranicznego występują dość istotne rozbieżności, wskazujące na istotny brak precyzji w tworzeniu, przetwarzaniu, aktualizacji i przekazywaniu informacji przez odpowiedzialne za to instytucje.

Pseudodwersyfikacja dostaw ropy i gazu do polski

Kopalne źródła energii pierwotnej wyczerpują się i proces ten będzie ulegał przyspieszeniu nie tylko wskutek wzrostu liczby ludności świata, ale także wskutek szybkiego wzrostu poziomu cywilizacyjnego zaniedbanych gigantów demograficznych: Chin, Indii, Dalekiego Wschodu, Ameryki Południowej, Afryki.

Konkurencja w wyścigu do źródeł energii pierwotnej będzie gwałtownie wzrastać. W miarę powolnego w skali życia człowieka nasilania się sytuacji kryzysowej posiadacze zasobów energetycznych będą coraz bardziej troszczyć się o swój byt i przetrwanie, a coraz mniej o dobre interesy ze sprzedaży zasobów dla przetrwania innych. Sytuacja wówczas może stać się wysoce konfliktowa.

Pierwszym znakiem kryzysu będzie zapewne postępujący spadek produkcji paliw napędowych z ropy oraz wzrost cen, co może nastąpić stosunkowo szybko. Nie ma czarodziejskiej różdżki, która by rozwiązała ten problem.

Nasilanie się objawów globalnego kryzysu energetycznego może spowodować, że strategicznym celem każdego państwa będzie się stawało zapewnienie sobie wielopokoleniowego bezpieczeństwa energetycznego. Jest to sytuacja wysoce konfliktogenna i niebezpieczna.

W Polsce praktycznie nie ma strategicznej koncepcji realizowania takiego celu. Nie ma strategii energetycznej, rozumianej jako dalekosiężna, perspektywiczna, spójna pragmatyczna i ciągła polityka, określająca metody, etapy, szczegółowe cele i zadania oraz sposoby wykorzystania środków politycznych, ekonomicznych, naukowych i technicznych dla realizacji celu strategicznego. Przeciwnie, polska polityka energetyczna jest od lat krótkookresowa, nieciągła i w znacznym stopniu zdeterminowana przez interesy sektora paliwowo-energetycznego oraz lobbing z tym związany, a także (niestety) koniunkturalna, zideologizowana i obciążona różnymi fobiami.

Towarzyszący temu hałas medialny powoduje, że głosy odmienne od głosów tzw. koncesjonowanych specjalistów, nie znajdują należytego odbioru wśród elit politycznych. W tych warunkach pojęcie bezpieczeństwa energetycznego i dywersyfikacji dostaw oparto na przyjęciu takich źródeł ropy i gazu, które nie są związane z Rosją. Stąd nasze demonstracyjne odcinanie się od North Stream, tzw. „pieriemycki”, historia Jamału II, wspieranie gazociągu z Niemiec (Wilhelmshafen) etc. Rusofobia przekładająca się na politykę zagraniczną i gospodarczą, w tym energetyczną, zamyka drogi do realnych ocen sytuacji i sensownych działań w stosunku do inwestycyjnych zamierzeń i projektów rosyjskich. Najgorszym dla Polski rozwiązaniem byłoby a priori ignorowanie propozycji lub protesty, zamiast profesjonalnych negocjacji.

W ostatnich latach import pokrywa zapotrzebowanie Polski na ropę naftową w ok. 95,5-97%, a na gaz ziemny w ok. 70%. W dekadzie 2002-2012 import ropy wzrósł o prawie 40%, a gazu o prawie 50%. Głównym dostawcą ropy była i jest nadal Rosja, z udziałem w imporcie ponad 95% (2012). Podstawową drogą dostaw ropy pozostaje rurociąg Przyjaźń. Udział Rosji w polskim imporcie gazu ostatnio „zmalął” do ok. 80% wskutek uruchomienia dwóch interkonektorów (połączeń międzysystemowych) z Niemcami (przez Lasowo) oraz z Czechami (przez Cieszyn). Nie oznacza to zmniejszenia udziału rosyjskiego gazu w polskim imporcie, bo całość lub znaczna część dostaw gazu przez oba interkonektory może być gazem dostarczanym przez Gazprom na rynek niemiecki. Autor nie napotkał danych, ile płacimy Niemcom i Czechom za dostawy gazu z Rosji do Polski.

Strukturę polskiego importu ropy i gazu w latach 2011/2012 pokazano w tabeli 5.

Tabela 5. Struktura polskiego importu ropy i gazu. Dane wg [58], zestawienie własne.

Import ropy naftowej wg kraju pochodzenia					Import gazu ziemnego wg kraju pochodzenia				
Rok	2011		2012		Rok	2011		2012	
Kraj	tys. ton	%	tys. ton	%	Kraj	tys. ton	%	tys. ton	%
Rosja	21 853	91,9	23 518	95,5	Rosja	9 549	85,5	9 261	79,8
Norwegia	1 337	5,6	828	3,4	Niemcy	1 625	14,5	1 788	15,4
Wlk. Bryt.	477	2,0	b.d.	b.d.	Czechy	b.d.	b.d.	556	4,8
Pozostałe	125	0,5	287	1,1					
Razem	23 792	100,0	24 633	100,0	Razem	11 174	100,0	11 605	100,0

W odniesieniu do ropy naftowej pozycja Rosji nie wydaje się zagrożona. Supertankowce z ropą raczej nie wejdą na Bałtyk, bo Cieśniny Duńskie wymuszają maksymalne zanurzenie do 14,5 m.

W opisanych wyżej uwarunkowaniach nasze dotychczasowe działania na rzecz dywersyfikacji źródeł zaopatrzenia Polski w ropę i gaz są nad wyraz krótkowzroczne. Marnujemy np. energię i kapitał polityczny na wspieranie rurociągu NABUCCO, którym do Polski nigdy nic nie popłynie, a na południe Europy niewiele. Kto bowiem na świecie ma naprawdę ropę i gaz? Strategiczne działania gospodarcze i kierunki polityki zagranicznej w zakresie dywersyfikacji źródeł zaopatrzenia Polski w ropę naftową i gaz muszą być zdeterminowane realną zasobnością źródeł zaopatrzenia (tabela 6).

Są tylko dwa strategiczne źródła ropy naftowej: pierwsze – Bliski Wschód i drugie – Rosja ze stowarzyszonym Kazachstanem (6-krotnie mniejsze), a także tylko dwa strategiczne źródła gazu: Bliski Wschód i Rosja. Dostępność ciężkiej ropy z Wenezueli to jeszcze przyszłość. Na całej reszcie można budować rozwiązania doraźne, liczone w latach, a nie strategiczne, liczone w dziesięcioleciach.

Najdobitniej wyrazili to Niemcy, budując rurociąg bałtycki obok Polski, co w połączeniu z naszą polityką wschodnią jest dla Polski wysoce niekorzystne, by nie powiedzieć ogromnie niebezpieczne. Pragmatyzmu możemy się uczyć od Niemiec i Rosji. Solidarność europejska w obliczu głodu energetycznego może okazać się wysoce iluzoryczna.

Przedstawione wyżej fakty pokazują, jak naiwne jest podstawowe założenie powszechnej dostępności węgla, ropy, gazu ziemnego, paliw jądrowych „wobec dużych zasobów światowych”, przyjęte w tak ważnym dokumencie, jak „Polityka energetyczna Polski do 2030 roku” [49]. W tym kontekście polska strategia i bezpieczeństwo energetyczne stają się pojęciami złudnymi.

Tabela 6. Możliwości dywersyfikacji zaopatrzenia Polski w ropę i gaz.

Źródło: BPSR 2013	ROPA 2012				Kraj lub region	GAZ 2012		
	[Gt]	[Gb]	Udział	R/P		[Em ³]	Udział	R/P
Azerbejdżan	1,0	7,0	0,4%	29,1	Azerbejdżan	0,9	0,5%	57,1
Dania	0,1	0,7	*	9,7	Niemcy	0,1	*	6,1
Włochy	0,2	1,4	0,1%	33,7	Ukraina	0,6	0,3%	34,6
Kazachstan	3,9	30,0	1,8%	47,4	Kazachstan	1,3	0,7%	65,6
Norwegia	0,9	7,5	0,4%	10,7	Norwegia	2,1	1,1%	18,2
Polska	-	-	-	-	Polska	0,1	0,1%	28,3
Rumunia	0,1	0,6	*	19,1	Rumunia	0,1	0,1%	9,3
Federacja Rosyjska	11,9	87,2	5,2%	22,4	Federacja Rosyjska	32,9	17,6%	55,6
Turkmenistan	0,1	0,6	*	7,4	Turkmenistan	17,5	9,3%	>100
Wielka Brytania	0,4	3,1	0,2%	8,8	Wielka Brytania	0,2	0,1%	6,0
Uzbekistan	0,1	0,6	*	24,0	Uzbekistan	1,1	0,6%	19,7
Inne Eur.+ Eurazja	0,3	2,1	0,1%	14,8	Inne Eur.+ Eurazja	0,3	0,2%	29,2
Europa + Eurazja	19	140,8	8,4%	22,4	Europa + Eurazja	58,4	31,2%	56,4
Ameryka Płn.	33,8	220,2	13,2%	38,7	Ameryka Płn.	10,8	5,8%	12,1
Ameryka Śr. i Płd.	50,9	328,4	19,7%	>100	Ameryka Śr. i Płd.	7,6	4,1%	42,8
Afryka	17,3	130,3	7,8%	37,7	Afryka	14,5	7,7%	67,1
Azja Pacyfik	5,5	41,5	2,5%	13,6	Azja Pacyfik	15,5	8,2%	31,5
Bliski Wschód	109,3	807,7	48,4%	78,1	Bliski Wschód	80,5	43,0%	>100
UE	0,9	6,8	0,4%	12,1	UE	1,7	0,9%	11,7
Były ZSRR	17,1	126,0	7,5%	25,2	Były ZSRR	54,5	29,1%	71,0
Świat	235,8	1668,9	100%	52,9	Świat	187,3	100%	55,7

Oznaczenia: G giga = 10⁹ = miliard; E eksa = 10¹⁸ = trylion; t – tona; b - baryłka

Źródło danych [15]/2013, podkr. dodatkowe własne.

Czy zatem żyjemy i wiecznie żyć będziemy w ułudnym świecie o nieograniczonych zasobach po przystępnych cenach? Czy nowe dane, coraz bardziej niepokojące, dotrą wreszcie do świadomości ludzkiej i wywołają reakcję obronną?

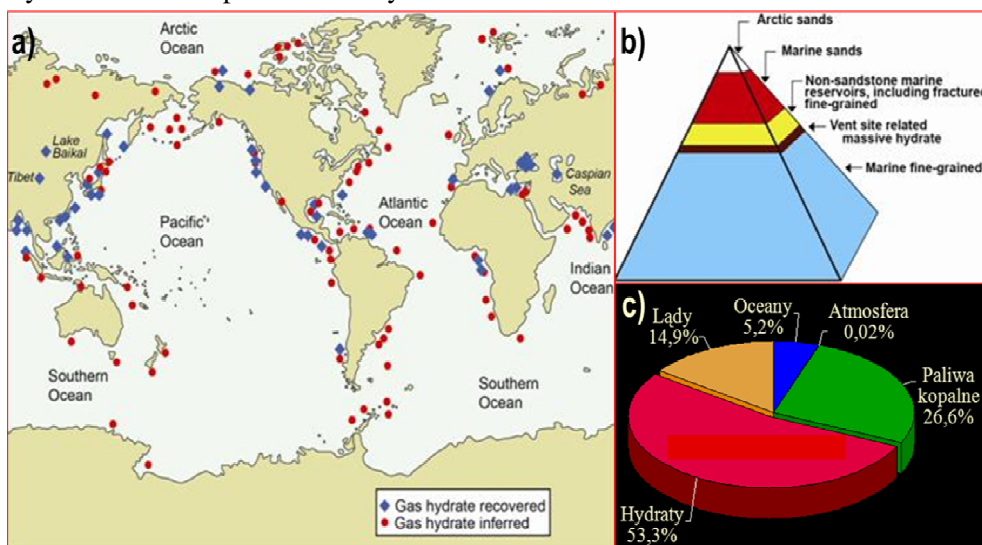
Wobec narastającego zagrożenia nie tylko lokalnym, ale nade wszystko globalnym kryzysem energetycznym związanym z wyczerpywaniem ziemskich źródeł kopalnych energii pierwotnej, pojawia się pytanie, czy i jakie są na ziemi alternatywne źródła energii, czy istnieje jakieś paliwo ratunkowe?

Alternatywne źródła energii pierwotnej

Hydraty metanu

Niektóre kręgi specjalistów przywiązują dużą wagę do przyszłej roli hydratów metanu. Składają się one z cząsteczek gazu zamkniętych w sieci krystalicznej wody. Jest to bardzo wydajne źródło metanu, ponieważ 1 m³ hydratu złożony z ok. 0,79 m³ wody i ok. 0,21 m³ gazu zawiera ok. 164,6 Nm³ metanu. Jest to dotychczas nieeksploatowane, ogromne źródło energii pierwotnej i cenny surowiec chemiczny. Wiedza o zasobach oraz eksploatacji hydratów i o technologii produkcji oraz transportu metanu jest jednak jeszcze w powijakach, jak-

kolwiek prowadzone są intensywne badania w tym zakresie. Światowe złoża hydratów metanu pokazano na rys. 15.



Rys. 15. Hydraty metanu na świecie: a) rozmieszczenie lądowych, przybrzeżnych i morskich złóż hydratów na ziemi (♦ – złoża potwierdzone badaniami bezpośrednimi – ok. 30%, ● – prawdopodobne złoża wg badań sejsmicznych); b) piramida zawartości (względnych ilości) hydratów metanu w różnych rodzajach złóż; c) występowanie węgla organicznego na ziemi. Dane wg USGS [52], opr. własne.

Ponad 53% węgla organicznego na Ziemi zawierają hydraty metanu (rys. 15c). Dostępność eksploatacyjna, a więc i przydatność do celów energetycznych różnych rodzajów złóż, maleje od szczytu do podstawy piramidy, w tym ze względu na EROEI i opłacalność ekonomiczną ich eksploatacji.

Światowe zasoby naturalnych hydratów metanu do połowy lat 90. XX w. były oceniane [52] na ponad 18000 Gtoe (gigaton ekwiwalentu ropy). Jest to prawie dwa razy tyle, co pozostałych geopaliw łącznie. W ciągu ostatnich 15 lat badacze stwierdzili duże różnice koncentracji hydratów w osadach morskich i ich zasoby zaczęto korygować w dół, od (10^5-10^8) Tcf do $(10^5-5 \times 10^6)$ Tcf (przypis¹³), z czego nie wszystkie zasoby będą zapewne miały koncentrację pozwalającą na ich eksploatację. Nie są zbadane i oszacowane zasoby gazohidratów pod lodowcami antarktycznymi, co może spowodować przyszłe korekty w górę. Wobec tych niejasności, w tabeli 8 przyjęto do obliczeń ww. zasoby z lat 90.

Geotermia

Źródłem energii geotermalnej jest wewnątrz Ziemi o temperaturze około 5400 °C, generujące przepływ ciepła w kierunku powierzchni. Moc ciepła wypływającego na powierzchnię Ziemi wynosi ok. 46 TW, stąd średni strumień

geotermalny wynosi ok. $0,063 \text{ W/m}^2$, a średni gradient temperatury ok. 25 K/km . Jest to niewystarczające do eksploatacji bezpośredniej (do ogrzewania wystarczy woda geotermalna o temperaturze $35\text{-}100 \text{ }^\circ\text{C}$ stopni, ale do produkcji energii musi ona mieć temperaturę ponad $100 \text{ }^\circ\text{C}$). W praktyce geoenergia może być pozyskiwana w tzw. rejonach hipertermicznych o gradiencie temperatury ponad 80 K/km , ew. semitermicznych ($40\text{-}80 \text{ K/km}$). Na razie energia geotermalna jest zbyt droga, by wykorzystywać ją na dużą skalę w energetyce i ma sens jedynie jako uzupełnienie innych źródeł energii, ale występowanie na danym obszarze rejonów hipertermicznych z wysokotemperaturową wodą termalną otwiera możliwości rozwoju taniej i ekologicznej energetyki na skalę lokalną. Rozwój tej geoenergetyki jest jednak dodatkowo uwarunkowany pokonaniem znanych trudności eksploatacyjnych (mineralizacja wód geotermalnych powoduje wytrącanie się soli w instalacjach przy odbieraniu ciepła), a nadto ekonomicznych (brak systemowych gwarancji zwrotu kosztów wierceń, o ile instalacja w danym miejscu okaże się niemożliwa).

Fuzja jądrowa

Energetyka jądrowa EJ, oprócz opisanych wyżej technologii wykorzystujących energię rozszczepiania atomów, ma także drugie oblicze: fuzję (syntezę) jądrową FJ [34]. Jest to jedyna obecnie znana teoretyczna szansa zażegnania kryzysu energetycznego przez opanowanie magnetycznej fuzji jądrowej jako taniego źródła energii pierwotnej (brak akcji ciągłej obecnie wyklucza fuzję laserową z zastosowań energetycznych). Reakcja syntezy jądrowej ma zasadniczą przewagę nad reakcją rozszczepiania jądra atomu. Jest najskuteczniejszym znanym procesem pozyskiwania energii wskutek przemiany masy materii. Nie jest reakcją łańcuchową. Jest dużo bardziej bezpieczna, nie jest możliwy proces niekontrolowany. Wskutek reakcji FJ nie powstają radioaktywne odpady lub inne niebezpieczne substancje. Dla zatrzymania reakcji wystarczy odciąć dostarczanie paliwa. Paliwem są ciężkie izotopy wodoru deuter i tryt (otrzymywany z litu), a odpadem nieszkodliwy hel. Do utrzymania reakcji w czasie 1 minuty potrzeba zaledwie kilku gramów plazmy. Z punktu widzenia dających się przewidzieć potrzeb, zasoby paliw dla FJ (deuteru i litu) są praktycznie niewyczerpalne.

Budowa i upowszechnienie w skali globalnej takich reaktorów wymaga jednak rozwiązania wielu problemów oraz pokonania poważnych trudności naukowych, technicznych i technologicznych, dotyczących w szczególności: wytrzymałości materiałów do budowy komory spalania, ich odporności na erozję plazmową oraz radioaktywność indukowaną pod działaniem strumienia neutronów (tj. mających możliwie krótki czas zaniku tej radioaktywności), systemów dostarczania paliwa i sterowania jego wewnętrznym obiegiem, koncentracji i podgrzewania oraz długotrwałego utrzymywania w obszarze plazmowym mieszaniny deuteru i trytu pod wielkim ciśnieniem i w temperaturze rzędu 100 milionów stopni, regulacji mocy, systemów wychwytywania energii syntezy i jej przetwarzania do postaci użytkowej, zapewnienia ciągłej pracy reaktora i in. Są to problemy niezwykle trudne i kosztowne.

Dlatego nie mamy jeszcze technologii przydatnej do powszechnego zastosowania FJ w energetyce. Jest to nadal zbyt odległa przyszłość. Decyzją z 2005 r., w Cadarache k. Marsylii rozpoczęto w 2007 r. budowę ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) [54]. Pierwszy zapłon jest przewidywany na rok 2016, planowana jest praca reaktora przez 20 lat. Koszt ITER wyniesie w przybliżeniu 10 mld euro (50% UE, po 10% Chiny, Japonia, Korea Płd., Rosja i USA). Moc i czas reakcji fuzyjnej to 500 MW przez 500 sekund. Średnica pierścienia plazmy 12 m, objętość komory spalania $\sim 1000 \text{ m}^3$. Planowany jest dodatni bilans mocy przy ok. 10-krotnym jej wzmocnieniu. Energia będzie wydzielana w postaci ciepła, nie było planowane przetwarzanie jej na energię elektryczną.

Dopiero wynikiem projektu ITER mają być dane bazowe do budowy pokazowej elektrowni termojądrowej DEMO (3-4 GW). W materiałach Parlamentu Europejskiego [53] dotyczących projektu ITER i budowy DEMO zakłada się, że ta technologia „może w znacznym stopniu przyczynić się do urzeczywistnienia zrównoważonych i pewnych dostaw energii UE za około pięćdziesiąt lub sześćdziesiąt lat, po penetracji rynku przez komercyjne reaktory syntezy jądrowej”. To bardzo długi czas, ok. 80% okresu wystarczalności (tabela 8, e. p. 1 dla x) wszystkich znanych i dostępnych geopaliw. Nie można obecnie stwierdzić, że np. hydraty metanu pozwolą przetrwać przez ten okres bez poważnego wstrząsu cywilizacyjnego.

Są również rozwijane konkurencyjne koncepcje budowy reaktorów wykorzystujących FJ. W USA od 1983 r. są prowadzone prace nad reaktorem „Polywell” („wielostudnia”), łączącym zasady magnetycznego i inercyjnego elektrostatycznego skupiania plazmy z ostatecznym celem uzyskania energii z reakcji kontrolowanej syntezy termojądrowej [55] (finansowane od 1987 r. przez US Navy).

We wrześniu 2009 r. Departament Obrony Stanów Zjednoczonych ogłosił kontynuowanie finansowania projektu Plan Plasma Fusion (Polywell). Prace te mają zweryfikować teoretyczne podstawy fizyczne koncepcji reaktora Polywell, a także dostarczyć danych na temat potencjalnych zastosowań syntezy Polywell. Są kontrakty na konstrukcję nowego prototypu Polywell. Wyścig trwa.

Zimna fuzja

Tak zwana zimna fuzja, inaczej zwana reakcją jądrową o niskiej energii (ang. LENR) jest hipotetyczną metodą fuzji jąder atomowych, przeprowadzaną w temperaturze znacznie niższej niż dla znanych obecnie reakcji termojądrowych. Pierwsze ogłoszenie w 1989 możliwości przeprowadzenia zimnej fuzji nie zostało potwierdzone, a sprawa uznana za mistyfikację. Od tego czasu mnożą się liczne doniesienia na ten temat, przeważnie publicystyczne – ale także komentarze naukowców, pedantycznie zgromadzone w [56] (ponad 400 poz. lit.). Opiswane są metody chemiczne (elektrolityczna, katalityczne), fizyczne (piroelektryczna, magnetyczna, ultradźwiękowa zwana sonofuzją) etc. Najnowsze doniesienia dotyczą urządzenia E-Cat (Energy Catalyzer), dokonującego zimnej fuzji niklu i wodoru, w obecności katalizatora o utajnionym składzie, z wytworzeniem miedzi oraz z wydzieleniem energii cieplnej zamienianej następnie na energię elektryczną. Fizyka „oficjalna” początkowo to zakwestiono-

wała, ale twórcy uzyskali patent i oferują urządzenia o mocy 1 MW oraz okresie działania 30 lat, jako rozwiązanie rynkowe, które ma być gotowe w latach 2012-2013. W 2013 r. grupa niezależnych ekspertów opublikowała raport o przeprowadzonych dwóch testach reaktorów E-Cat, które wykazały produkcję energii cieplnej w ilości wykraczającej o ponad rząd wielkości poza możliwości znanych chemicznych źródeł energii. Czas niebawem pokaże realną wartość wynalazku i jego twórców.

Informacje powyższe są wystarczające dla przedstawienia pełnego obrazu kontrowersji wokół LENR, ale nawet przy założeniu pełnego sukcesu wynalazców, reakcja ta, ze względu na małą skalę, nie stanowi obecnie sensownej alternatywy dla użytkowanych technologii energetycznych.

Odnawialne źródła energii

Do źródeł odnawialnych są zaliczane takie źródła, których zasób odnawia się w krótkim czasie: energia wody (opady, pływy morskie, fale morskie) lub wiatru, wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej, oraz energia słoneczna lub geotermalna, wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej lub ciepła, a także biomasa (w tym biopaliwa). Ich wspólną wadą (z wyjątkiem geotermii) jest zależność procesu generowania energii od zmian uwarunkowań zewnętrznych, takich jak cykl pór roku, cykl dobowy, czy też warunki meteorologiczne. Odnawialne źródła energii zaspokajają około 8,5% zapotrzebowania ludzkości na energię, z czego 6,7% zaspokajają hydroenergetyka. Nieprecyzyjne i niepełne, a niekiedy rozbieżne są dane dotyczące roli biomasy w globalnej gospodarce energetycznej.

Nader skromny jest więc udział odnawialnych źródeł energii, pomimo gromkiej publicystyki na ten temat. Zestawienie porównawcze struktury zużycia energii pierwotnej w latach 2000 oraz 2012 ze źródeł odnawialnych i nieodnawialnych pokazane zostało w tabeli 7.

Tabela 7. Porównanie udziałów zużycia energii* pierwotnej z różnych źródeł w latach 2000 i 2012 [15]								
Źródło energii	Ropa	Gaz	Węgiel	Uran	Odnawialne razem**	W tym wodne	W tym pozostałe odnawialne	Razem świat
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zużycie energii w roku 2012 [Mtoe]	4130,5	2987,1	3730,1	560,4	1068,5	831,1	237,4	12476,6
Udziały w 2012 r. [%]	33,2	23,9	29,9	4,5	8,5	6,7	1,9	100,0
Udziały w 2000 r. [%]	34,8	21,1	23,5	6,8	13,8	2,3	0,5	100,0

*Energia pierwotna obejmuje paliwa handlowe oraz nowoczesne źródła odnawialne do produkcji energii elektrycznej.
 **W tym biomasa: 11% w roku 2000. W roku 2012 udział produkcji biopaliw 60,2 Mtoe, tj. 0,5%; biomasa nieuwzględniona.

Od początku XXI wieku światowe inwestycje w odnawialne źródła energii rosną w sposób wykładniczy. Jest to spowodowane z jednej strony spadkiem ich cen, a z drugiej – dopłatami wprowadzanymi przez wiele państw. W szczególności dotyczy to elektrowni wiatrowych i słonecznych.

Energia słoneczna, będąca energią fuzji jądrowej, jest na Ziemi dostępna od zawsze, z dużym nadmiarem, ale nadal nie umiemy jej właściwie wykorzystać [10]. Z docierającej do nas energii słonecznej, przy powierzchni Ziemi można efektywnie wykorzystać do 1000 W/m^2 , w zależności od szerokości geograficznej, pory roku, pory doby, klimatu, pogody etc. W Polsce średnia roczna gęstość mocy solarnej wynosi $\sim 105\text{-}125 \text{ W/m}^2$, a średnie nasłonecznienie (roczna gęstość strumienia energii) wynosi $3,3\text{-}4,0 \text{ GJ/m}^2$ rok. Jakkolwiek energia słoneczna jest prazródłem wszystkich odnawialnych źródeł energii, a także paliw kopalnych na bazie węgla organicznego, to jej wykorzystanie napotyka podstawową sprzeczność. Bieżąco dociera ona do Ziemi w sposób rozproszony. Była przetwarzana przez miliony lat poprzez procesy bioorganiczne do postaci wysokiej koncentracji w węglowodorowych paliwach kopalnych. Wszystkie nasze technologie energetyczne polegają na wykorzystaniu tego koncentratu i rozproszeniu energii. Obecnie potrafimy koncentrować energię słoneczną w postaci biomasy, ale jest to proces o relatywnie małej efektywności, podobnie jak metody bezpośredniego przetwarzania promieniowania słonecznego na ciepło lub elektryczność, wykorzystywania energii wiatrów, pływów, fal morskich, ciepła oceanów, czy też energii geotermalnej [30, 31].

Zgodnie z założeniami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 r. w sprawie promowania energii elektrycznej produkowanej z odnawialnych źródeł energii na wewnętrzny rynek energetyczny UE, zakładano osiągnięcie do końca 2010 r. średniego wskaźnika na poziomie 12% energii ze źródeł odnawialnych, w stosunku do całkowitego zużycia energii w UE.

Europejskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej (EWEA) opublikowało ostatnio raport „Pure Power” zawierający analizę dotychczasowego rozwoju energetyki wiatrowej w UE oraz scenariusze rozwoju tego sektora do roku 2020 i 2030 w krajach członkowskich. Według autorów raportu energetyka wiatrowa na lądzie jest najtańszą z dostępnych technologii OZE, więc będzie miała największy wkład w osiągnięcie celu obligatoryjnego Dyrektywy 2009/28/WE, określającego dochodzenie do określonego udziału energii z OZE w bilansie zużycia energii finalnej w 2020 r.

Cel wyznaczony przez EWEA dla energetyki wiatrowej wzrósł ze 180 GW do 230 GW w roku 2020 oraz z 300 GW do 400 GW w roku 2030 (180 GW i 300 GW to scenariusz „niskiego” rozwoju, 230 GW i 400 GW to scenariusz „wysokiego” rozwoju). Osiągnięcie tego celu będzie wszakże uwarunkowane rozwojem wspólnego europejskiego systemu elektroenergetycznego. Scenariusz „niski” przewiduje dla Polski w 2020 r. moc elektrowni wiatrowych 10 500 MW, tj. wzrost mocy zainstalowanej o ok. 836 MW rocznie i produkcję energii elektrycznej ok. 25,4 TWh (tj. ok. 12,5% udziału energetyki wiatrowej w produkcji energii elektrycznej, przy obecnej produkcji mniejszej od 1 TWh). Scenariusz „wysokiego” rozwoju prognozuje w 2020 r. odpowiednio: 12500 MW; 1002 MW/r.; 30

TWh; 14,8%. Dla Polski już scenariusz „niski” oznacza osiągnięcie w roku 2020 udziału wyższego od 12% wskazywanych przez Komisję Europejską.

Ilościowe oszacowanie wykorzystania innych odnawialnych źródeł energii jest obecnie rzeczą bardzo trudną (brak precyzyjnych badań i danych). Szczególne trudności sprawia np. oszacowanie ilości paliw odnawialnych wykorzystywanych w gospodarstwach domowych (drewno, torf, paliwa odpadowe). Udział źródeł odnawialnych w Polsce w 2002 roku został określony na około 2,5%. Założenia polityki energetycznej Polski do 2020 roku określają wzrost tego wskaźnika do 5%.

Należy podkreślić, że energia ze źródeł odnawialnych to głównie energia elektryczna, która stanowi, np. w Polsce, tylko ok. 11% zużywanej energii pierwotnej. To pokazuje problem skali jej produkcji, niezależnie od potrzebnych użytkowo różnych postaci (nośników) tej energii.

Ad absurdum

Dla dobitnego przedstawienia realnych możliwości odnawialnych źródeł energii, wyolbrzymianych często w propagandowej publicystyce, celowe i pożyteczne jest sprowadzenie problemu do skrajności, za pomocą pokazania kilku charakterystycznych przykładów.

Przykład 1. Roczne potrzeby paliwowe elektrowni o mocy 1000 MW = 1GW zasilanej z różnych odnawialnych źródeł energii (przy typowych pozostałych uwarunkowaniach) [5]

- Biomasa (drewno), 16 MJ/kg, 2000 km² upraw, 3 Jeziora Bodeńskie.
- Biogaz (odzwierzęcy), 17-27 MJ/m³, 20000000 świń (gnojowica), 0,2-0,3 m³ gazu/świnie/dziennie.
- Słońce (fotowoltaika), 23 km² paneli na równiku – 2555 boisk piłkarskich
- Wiatr (wiatrak 1,5 MW), 2700 wiatraków po 1,5 MW, 486 km² – jeziora mazurskie.

Przykład 2. Realia rozwojowe energetyki solarnej w Polsce

Hipotetyczne przejście **tylko użytkowników komunalnych** na energię słoneczną.

Założenia (typowe): średnie zapotrzebowane energii *per capita* 20 kWh/dobę, potrzebna moc *per capita* ok. 4 kW, czas efektywnego naświetlania (średniorocznie) 50%, ceny i parametry wg 2009 r.

Oszacowanie: 1 panel 210W / 1,5m² / 18,5kg + zasobniki + infrastruktura w komplecie;

Potrzeba *per capita* (dla 4 kW) ok. 20 kpl. jw., tj. panele 30m² / 370kg z wyposażeniem.

Potrzeby w skali kraju: 800 mln paneli o łącznej powierzchni 1200 km² i wadze 15 Mt, wraz z zasobnikami oraz infrastrukturą, koszty ponad 5 bln zł.

Przykład 3. Realia rozwojowe energetyki jądrowej na świecie i w Polsce

Hipotetyczne przejście **całkowite** na energetykę odnawialną i jądrową (50%/50%).

Założenia: 2005-2105 (100 lat do całkowitego przejścia, wyczerpywanie złóż ropy, gazu i węgla)

Oszacowanie (przy średniej stopie wzrostu potrzeb energetycznych 2%/r. Świat **2005:** potrzeby energetyczne **480EJ/r.**, potrzebna moc 15000 GW, tj. **7500 reaktorów po 1GW.**

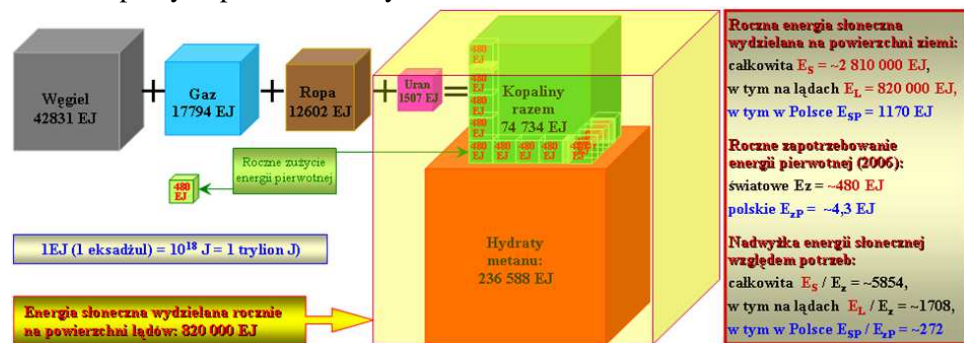
Świat **2105:** potrzeby energetyczne **3500EJ/r.**, potrzebna moc 115000GW, tj. **+50000 reaktorów 1GW.**

Polska **2005:** potrzeby energetyczne **100TWh/r.**, potrzebna moc 120 GW, tj. **60 reaktorów 1 GW.** Polska **2105: analogicznie +440 reaktorów jw.**

Dla wprowadzenia w życie tej ostatniej hipotezy, trzeba by było przez 100 lat zbudować co roku w Polsce 5 reaktorów atomowych o mocy 1GW, a w skali świata 500. Takie są zarazem docelowe determinanty popytu na uran i tor. Drugie tyle energii pierwotnej powinny dostarczyć światu źródła odnawialne (przykłady 1 i 2), które trzeba by dopiero zbudować. Problem wystarczalności materiałów do ich budowy nie jest nawet rozpoznany. Tymi metodami produkuje się głównie energię elektryczną, a tylko dodatkowo także ciepłą. Losowy charakter pracy źródeł odnawialnych słonecznych i wiatrowych, zależnych od wpływu przypadkowych czynników zewnętrznych, stwarza konieczność magazynowania energii elektrycznej. Wymaga to tworzenia, wdrażania i upowszechniania nowych, skutecznych i energooszczędnych technologii zasobnikowych użytkowania energii elektrycznej. Badania naukowe i prace rozwojowe w zakresie nowych zasobników energii elektrycznej są prowadzone, ale nie ma systemowego wsparcia dla równoważenia dotychczasowych dysproporcji między działaniami na rzecz wytwarzania oraz magazynowania, przetwarzania i użytkowania energii elektrycznej z OZE.

Geopaliwa razem – w świetle słońca

Proporcje energii słonecznej oraz energii pierwotnej ze wszystkich razem źródeł kopalnych pokazano na rys. 16.



Rys. 16. Światowe zasoby energii pierwotnej [EJ] ze źródeł kopalnych, oszacowane z prawdopodobieństwem 95% wg danych za rok 2005 [10] i bilans energii słonecznej. Średnie przeliczniki wg World Energy Council [11].

Wartości energii pierwotnej zawartej w poszczególnych geopaliwach są orientacyjnie odwzorowane objętością sześcianów na rys. 16. W roku 2005 zużycie energii pierwotnej wyniosło ok. 480 EJ. Oszacowanie wystarczalności wszystkich kopalin razem metodą r/p można zilustrować prostym rzutowaniem sześcianów (480 EJ do 74734 EJ), z którego wynika iż jest to ok. $5,4^3$ tj. ponad 150 lat. Zarazem jest to ilustracją istotnego błędu tej powszechnie wykorzystywanej metody, bowiem w tym okresie roczne zużycie energii będzie wzrastało o ok. 2% rocznie (przypis ¹), tj. po tych 150 latach wynosiłoby ponad 5700 EJ. Rzeczywisty okres wystarczalności będzie więc krótszy (tabela 8). W dostępnej literaturze autor nie napotkał uzasadnienia takiego postępowania. Efektem tego jest jedynie bardziej optymistyczny obraz trwałości i stabilności polityki rządów, agencji i koncernów energetycznych.

Wystarczalność globalna wszystkich geopaliw łącznie

Wszystkie geopaliwa będące nieodnawialnymi źródłami energii pierwotnej (ropa, gaz, węgiel, uran + tor, hydraty metanu) należy traktować jednakowo, kierując się tymi samymi zasadami oceny ich wystarczalności, przy znanym i prognozowanym tempie globalnego wzrostu rocznego zapotrzebowania energii pierwotnej (średnia 30-letnia 1970-2000 ok. 2%). Oznacza to, że proces ich produkcji również podlega modelowi Hubberta.

Nie ma logicznych przesłanek innego traktowania problemu.

Obecny poziom techniki i badania naszego globu pozwoliły na w miarę wiarygodne oszacowanie istniejących zasobów kopalnych źródeł energii pierwotnej [3, 4, 24]. Nie należy więc oczekiwać wielkich odkryć np. ropy i in., cudownie zmieniających katastrofalny obraz sytuacji. Dostępne źródła zawierają znaczne rozbieżności dotyczące realnie lub hipotetycznie istniejących zasobów geopaliw. Największe są rozbieżności danych o zasobach uranu, zasoby toru nie są uwzględniane w statystykach międzynarodowych. Jest to uściślane, ale nie ma praktycznego znaczenia dla generalnego obrazu sytuacji.

Jak podano wyżej, pod pojęciem wystarczalności dowolnego geopaliwa rozumie się zazwyczaj liczbę lat, oszacowaną jako iloraz r/p (przypis ⁵), tj. rezerw do produkcji w roku poprzedzającym prognozę. Jest to podejście niewłaściwe, dające zawyżone wyniki. Analiza danych z minionych lat wskazuje na celowość przyjmowania uśrednionej stałej wartości rocznej stopy procentowej wzrostu zużycia danej kopaliny, co powinno być powszechnie przyjmowane w prognozach perspektywicznych.

Z danych na rys. 4.b wynika, że nawet znaczne zmiany tego wskaźnika, czy też wielkie (wirtualne) zwiększanie zasobów (hipotetyczne nowe odkrycia), przesuują peak oil w granicach zaledwie 10-20 lat.

Dla oszacowania wystarczalności każdego z zasobów odrębnie oraz wszystkich łącznie została przyjęta metodologia postępowania umożliwiająca oszacowanie minimalnego oraz maksymalnego okresu wystarczalności dotychczas rozpoznanych geopaliw [20, 25].

Do analizy wzięto pod uwagę zasoby: ropy, gazu, węgla (kamiennego i brunatnego łącznie), uranu dla przypadku cyklu paliwowego otwartego oraz

z uwzględnieniem toru w przypadku reaktorów prędkich z cyklem paliwowym zamkniętym, a także hydratów metanu.

Na podstawie dostępnych danych, wzorem USGS (rys. 4.b), określono trzy kategorie zasobów:

- x** – istniejące z wysokim prawdopodobieństwem $p \geq 95\%$, eksploatowane lub możliwe do uzasadnionej ekonomicznie eksploatacji w obecnych warunkach technologicznych, inaczej: rezerwy (*reserves*) – udokumentowane, udostępnione, przemysłowe, konwencjonalne, potwierdzone bezpośrednio, etc.;
 - y** – istniejące z umiarkowanym prawdopodobieństwem, dokładnie nie określonym, ale zawartym w przedziale $95\% > p > 5\%$, dotychczas nieeksploatowane ze względów technicznych lub ekonomicznych, możliwe do przyszłej eksploatacji po zmianach warunków technologicznych lub ekonomicznych, inaczej: zasoby (*resources*) – szacunkowe, bilansowe, niekonwencjonalne, potwierdzone pośrednio etc.;
 - z** - istniejące z małym prawdopodobieństwem $p \leq 5\%$, inaczej: zasoby domniemane (*prognostic resources*) – nieudokumentowane, nieeksploatowane, innymi słowy w znacznym stopniu hipotetyczne, przewidywane na podstawie różnych przesłanek, oszacowane wg najbardziej optymistycznych prognoz.
- T** - zasoby całkowite przyjęto jako sumę trzech ww. kategorii zasobów, $T = x + y + z$.

Opracowano program komputerowy umożliwiający wielowariantową analizę danych niezbędnych do oszacowania wystarczalności poszczególnych zasobów.

Dla uzyskania poprawnych i porównywalnych wyników analizy, w przypadku każdego z wariantów pokazanych w tabeli 8 wykorzystano jednolite metody oszacowania wystarczalności zasobów geopaliw.

- Wszystkie zasoby energetyczne geopaliw wyrażono w **Mtoe**, średnie przeciętniki wg World Energy Council [30].
- Na podstawie danych z 30-lecia 1971 ÷ 2000 [20] oszacowano dwuwariantowo średnie stopy rocznego wzrostu zużycia (produkcji) poszczególnych geopaliw, jako $\%_s$ – składany i $\%_l$ - liniowy.
- Dla powyższych danych oszacowano w latach wystarczalność zasobów każdego z analizowanych geopaliw dla:
 - przypadku $\%_s$: dla zasobów **x**, **x + y**, **T = x + y + z** (dla uranu przy **CPO**; nie dotyczy uranu z torem przy **CPZ** w reaktorach powielających; nie dotyczy hydratów metanu, bo nie są znane **y** i **z**),
 - przypadku $\%_l$: dla granic zakresu zasobów **x** ÷ **T=x+y+z**
 - przypadków granicznych **x/P** ÷ **T/P** (P – produkcja w 2000 r).
- Wg analogicznej procedury oszacowano trzy warianty **łącznie** wystarczalności **energii pierwotnej e. p. 1 ÷ 3**, gdzie:
 - e. p. 1 → dla zasobów uranu w przypadku CPO, gazu, ropy i węgla (kamiennego z brunatnym),
 - e. p. 2 → jak e. p. 1 oraz hydratów metanu,

e. p. 3 → jak e. p. 2, ale dla zasobów uranu + toru w przypadku CPZ w reaktorach powielających.

Wyniki analizy przeprowadzonej wg powyższych zasad zostały zestawione w tabeli 8.

Tabela 8. Oszacowanie wystarczalności obecnych i przyszłych geopaliw [10, 11, 14, 26-33].

Źródło energii pierwotnej	Zasoby całkowite [Gtoe] T=x+y+z	Składniki zasobów [Gtoe]			Roczna stopa wzrostu zużycia		Wystarczalność od bazowego roku 2000 % _s [lata]			Wystarczalność x+T od bazowego roku 2000 przy produkcji P[Mtoe] % _l oraz x/P i T/P [lata]		
		x	y	z	% _s	% _l	x	x+y	T	x+T(% _l)	x/P+T/P	P
Uran CPO	344	33	15	296	2,6	2,9	32	41	104	35+173	49+508	676
Gaz	1263	425	438	397	3,0	4,7	66	87	100	101+201	202+601	2101
Ropa	2648	301	521	1822	1,4	1,7	57	106	178	64+290	86+762	3474
Węgiel	6271	1023	2352	2896	1,7	2,2	127	193	229	192+565	436+2678	2341
Energia pierwotna 1	10526	1782	3326	5411	2,0	2,7	76	121	155	101+312	179+1056	9963
Hydraty metanu	18836	5651										-
Energia pierwotna 2	29362	7433			2,0	2,7	139		205	254+559	746+2947	9963
U&Th CPZ*	632564	8802	5672	618090	2,6	2,9	229*	249*	398*	1036* +9109*		-
Energia pierwotna 3	661926	16235			2,0	2,7	176	208*	362	401+4886	1629+ 66438	9963

Gdzie: x, y, z – jak wyżej; CPO – cykl paliwowy otwarty uranu (dotychczasowa technologia, wykorzystanie od ok. 0,7-2 (3)% energii uranu); CPZ – cykl paliwowy zamknięty uranowo – torowy (reaktory powielające, założenie wykorzystania ok. 70% energii uranu + toru, z zastrzeżeniami jak niżej dla energii pierwotnej 3); energia pierwotna: 1 – łącznie dla dotychczasowych źródeł przy CPO; 2 – jak 1 z uwzględnieniem hydratów metanu; 3 – jak 2 przy CPZ – przy założeniu ilości uranu x/y/z: 3,3/1,5/29,6 Mt U i toru 1,2/1,4/2,0 Mt Th wg [33, 35÷37]; dane do symulacji z lat 1971/2000 wg [11];

* wartości porównawcze, zgrubnie oszacowane dla CPZ wg wybranych danych dla CPO; ilości Th prawdopodobnie zaniżone, nie ma dokładnych światowych danych statystycznych.

Trzy porównane metody analizy wystarczalności zasobów dają duże rozbieżności, wzrastające wraz z szacowanym okresem wystarczalności. Z zasady przezorności wynikają preferencje dla wariantu %_s, ponieważ stwarza największy margines bezpieczeństwa. Zarazem zasoby x wg tabeli 8 dla wariantu najostrożniejszego (%_s) rezultatów najlepiej odpowiadają rezerwom ropy O, gazu NG i węgla C pokazanym na rys. 14. Zbieżność wyników oszacowania okresów wystarczalności (w latach) wg tabeli 8 (O 66, NG 57, W 127) oraz wg rys. 14

(O 53, NG 56, W 109)²⁴ jest duża, co jest dodatkową przesłanką tych preferencji. Warianty $x/P \div T/P$ dają zawyżone wyniki²⁵.

Z uzyskanych dla wariantu najostrzejszego (%_s) rezultatów wynika kilka zasadniczych wniosków:

1. Realnie istniejące i osiągalne zasoby wszystkich geopaliw ($x+y$) przy dotychczasowym 2% średnim rocznym wzroście zużycia energii pierwotnej ulegną wyczerpaniu w przedziale ok. 70 – 120 lat (\rightarrow %_s, e. p. 1 dla $x \div x+y$).
2. Włączenie do eksploatacji olbrzymich i jeszcze nienaruszonych, ale zapewne nie całkiem osiągalnych zasobów hydratów metanu przedłuży ten okres o ok. 60 lat. (\rightarrow %_s, e. p. 1 \div e. p. 2 dla x).
3. Energetyka jądrowa o opanowanych lub przewidywanych technologiach rozszczepiania atomów przedłuży ten okres o kolejne 40 lat (\rightarrow %_s, e. p. 2 \div e. p. 3 dla x), a po wprowadzeniu prędkich reaktorów powielających i włączeniu do produkcji energii zasobów toru ludzkość zyska zapewne ponad 200 lat. (\rightarrow %_s, U&Th CPZ*, wyniki porównawcze o znaczeniu tylko orientacyjnym, zgrubnie oszacowane ze względu na brak danych dla CPZ oraz dla Th).
4. Energetyka jądrowa, wykorzystująca energię rozszczepiania atomów, nie jest w stanie rozwiązać problemu wyczerpywania zasobów geopaliw węglowodnorodnych ze względu na ograniczone zasoby uranu i toru. Jej rozwój jest jednak konieczny dla wydłużenia okresu potrzebnego ludzkości do uzyskania nowego, docelowego rozwiązania problemu i tę funkcję może i musi spełnić.
5. Żadna z wykorzystywanych dotychczas metod pozyskiwania energii pierwotnej nie pozwala na ostateczne wyeliminowanie zagrożenia naszej cywilizacji globalnym kryzysem energetycznym.

Główne kierunki globalnych i lokalnych działań antykryzysowych²⁶

Możliwości technologiczne działań antykryzysowych są bardzo ograniczone. Działania takie należy podejmować w trzech niżej podanych kategoriach.

W zakresie technologii znanych i obecnie stosowanych:

- silne stymulowanie ekonomiczne rozwoju technologii energooszczędnych we wszystkich dziedzinach;

²⁴ Są to oszacowania, z rozbieżnościami wynikającymi m. in. z różnicy lat dla różnych danych, różnic tych danych, porównywania wyników uzyskanych różnymi metodami (R/P i %_s) etc. Nie ma to znaczenia dla istoty kryzysu paliwowego.

²⁵ Oszacowanie metodą R/P (def. w przypisie ⁷) przy R= const. nie ma logicznego uzasadnienia w świetle danych statystycznych z kilkudziesięciu lat, wykazujących ustawiczny wzrost tego zapotrzebowania. Jest to błąd metody.

²⁶ W tej części wykorzystano [57] oraz końcowe materiały 24 Kongresu Techników Polskich z 2009 r., przygotowane przez zespoły robocze Rady Programowej KTP pod kierownictwem autora jako jej Przewodniczącego, a nadto niepublikowaną syntezę pokongresowych materiałów informacyjnych przekazanych na ręce Prezydenta RP oraz do BBN.

- systemowe wspieranie rozwoju odnawialnych źródeł energii, w tym elektrycznej;
- rozwój i upowszechnianie metod racjonalnego użytkowania energii, zwłaszcza elektrycznej;
- rozważne stymulowanie rozwoju energetyki jądrowej EJ, przy użyciu najlepszych z dotychczas wykorzystywanych reaktorów energetycznych III generacji; jest to konieczny pierwszy etap przejściowy, pozwalający odtworzyć i rozbudować polski przemysł pracujący dla EJ, ale nie docelowa jej koncepcja (ze względu na małe wykorzystywanie energii uranu).

W zakresie technologii badanych i rozwojowych:

- przyspieszanie rozwoju EJ wykorzystującej IV generację prędkich reaktorów powielających, o wielokrotnym recyklingu paliwa; jest to konieczny drugi etap przejściowy, pozwalający na maksymalne wykorzystanie energii ziemskich zasobów uranu i toru, dający naszej cywilizacji relatywnie długi czas na znalezienie docelowego rozwiązania problemu;
- przyspieszanie rozwoju technologii wodorowych w gospodarce, zwłaszcza w transporcie kołowym, maszynach rolniczych, budowlanych etc., dla zastąpienia ropo- lub węglopochodnych paliw płynnych.

W zakresie rozpoznanych technologii przyszłości:

- przyspieszanie prac nad fuzją jądrową jako praktycznie niewyczerpalnym źródłem energii pierwotnej oraz technologiami wodorowymi jako jej nośnikami;
- wspieranie eksperymentów z zakresu zimnej fuzji jądrowej, zwanej też reakcją jądrową o niskiej energii, na specjalnych zasadach wykraczających poza dzisiejszy zakres ryzyka naukowego.

Kierunki działań anty kryzysowych w warunkach polskich:

- Rząd Polski powinien przyspieszać podejmowanie decyzji politycznych i realizacyjnych o wprowadzeniu EJ wykorzystującej reaktory III generacji oraz o odtworzeniu i rozwoju krajowego potencjału badawczego w zakresie EJ, z docelowym ukierunkowaniem na reaktory powielające IV generacji, a nadto o wejściu do GIF – Międzynarodowego Forum Generacji IV pracującego nad systemami elektrowni jądrowych wykorzystujących takie reaktory.
- Wysoce korzystne dla Polski wydaje się przyspieszenie przeskoku technologicznego do reaktorów IV generacji, co pozwoli skrócić przejściowy etap EJ z reaktorami III generacji i możliwie szybko zmaksymalizować wykorzystanie energii uranu oraz toru. Realność i warunki dokonania takiego skoku technologicznego, którego idea i opłacalność wydają się uzasadnione, muszą być przedmiotem specjalistycznej ekspertyzy wykonanej dla Rządu. Pozwoli to uniknąć kolejnych kosztownych opóźnień, jakie wystąpiły wskutek przerwania pierwotnego polskiego programu budowy energetyki jądrowej. Dotyczy to również problemu fuzji jądrowej (ITER).
- Za preferowany przez Rząd kierunek rozwojowy w nauce i gospodarce należy uznać i systemowo stymulować technologie wodorowe, ponieważ wodór

jako nośnik energii pierwotnej, alternatywny do paliw ropopochodnych, może stać się podstawowym (a już obecnie dość dobrze rozpoznany) paliwem przyszłości dla systemów i środków transportu, możliwym do wytwarzania w przypadku opanowania fuzji jądrowej jako źródła energii pierwotnej.

Bezpieczeństwo energetyczne kraju

- Dla osiągnięcia w 2020 roku pożądanej dywersyfikacji struktury paliwowej krajowej elektroenergetyki niezbędne staje się włączenie do krajowego systemu elektroenergetycznego pierwszej elektrowni jądrowej i uzyskanie produkcji ok. 5,5-8 TWh. Wzrastający w następnych latach udział energii jądrowej przyczyni się do dalszego ograniczenia emisji CO₂, a także powinien być stabilizatorem cen energii elektrycznej.
- Zwiększenie udziału gazu w krajowej produkcji energii elektrycznej jest uzależnione od źródeł jego dostaw. Polska strategia w zakresie polityki zagranicznej i energetycznej musi uwzględniać fakt, że na świecie istnieją tylko dwa strategiczne źródła gazu: Bliski Wschód oraz Rosja (z udziałem Turkmenuistanu). Cała znana reszta rozproszonych drobnych zasobów gazu nie może być podstawą do żadnych długoterminowych działań strategicznych.
- Jeżeli polski gaz łupkowy okaże się w przyszłości dobrem realnie istniejącym i możliwym do eksploatacji przy energetycznej stopie zwrotu EROEI (przypis ⁶) możliwie większej od jedności, sytuacja może ulec radykalnej zmianie; granicą energetycznej opłacalności jest EROEI = 1, poniżej której każda cena jest zła. Po realnej ocenie wystarczalności zasobów gazu łupkowego może zasadniczo zmienić się sytuacja energetyczna Polski i będzie uzasadnione nowe podejście do dywersyfikacji struktury paliwowej elektroenergetyki krajowej. Obecnie nie ma rzeczowych podstaw do entuzjazmu.
- W przypadku sukcesu gazu łupkowego program dywersyfikacji struktury paliwowej elektroenergetyki powinien obejmować zarówno bloki gazowe do pracy szczytowej, jak i wysokosprawne kombinowane bloki gazowo-parowe do pracy podstawowej. Mogą one – poza nowymi lokalizacjami (np. w północnej części kraju, dla poprawy terytorialnej topologii źródeł energii) – zastępować także wyeksploatowane bloki węglowe w istniejących elektrowniach, przyczyniając się tym samym do ograniczenia emisji CO₂. Oczekiwana internalizacja kosztów zewnętrznych (głównie ochrony środowiska) powinna wówczas sprzyjać zwiększaniu udziału gazu w krajowej elektroenergetyce.
- Należy z dużą rezerwą traktować obecne zasady kształtowania rynku energii poprzez politykę Unii Europejskiej, dążącą do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla i ograniczenia jego niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne (w podtekście efekt cieplarniany etc.). Znane kontrowersje światowe wokół tej sprawy, niekiedy nabierające posmaku wręcz aferalnego, mogą mieć trudny do przewidzenia efekt końcowy i zmienić politykę UE w zakresie CO₂, co nie umniejsza roli odnawialnych źródeł energii. Kierując się zasadą przezorności, należy jednak prowadzić badania i próby nad rozsądnymi metodami zmniejszenia emisji CO₂ oraz niwelowania jej skut-

ków, w oczekiwaniu na ostateczne rozstrzygnięcie sprzeczności wokół efektu cieplarnianego i wpływu nań emisji dwutlenku węgla w skali globalnej. Należy z rozwagą analizować metodę sekwestracji dwutlenku węgla i jego składowania w strukturach geologicznych (CCS) ze względu na kontrowersje i zagrożenia, które rodzą się przy jej wykorzystaniu. Nie rozeznało dostatecznie wpływu tej metody oraz proponowanych lokalizacji magazynów CO₂ na ograniczanie potencjalnych możliwości wykorzystania energii geotermalnej lub gazu łupkowego. Sprawa potencjalnych kolizji w tym zakresie powinna stać się przedmiotem specjalistycznych analiz naukowych, technicznych i ekonomicznych w skali kraju.

- W obecnej sytuacji w Polsce jest konieczne z jednej strony wprowadzenie EJ jako niezawodnego i relatywnie taniego źródła energii, zwłaszcza elektrycznej, z drugiej zaś rozwijanie odnawialnych technologii wytwarzania i przetwarzania energii w synergicznym połączeniu z rozwojem energooszczędnych technologii użytkowania wszystkich rodzajów energii. Umożliwi to zmniejszanie intensywności eksploatacji dotychczasowych źródeł energii pierwotnej i wydłużenie okresu ich wystarczalności.
- Niezbędne jest utrzymanie i dalszy rozwój systemu wsparcia dla technologii wysokosprawnej kogeneracji energii elektrycznej i ciepłej na poziomie zapewniającym opłacalność inwestowania w nowe moce, z uwzględnieniem kogeneracji ze źródeł poniżej 1 MW; wymaga to stworzenia nowych możliwości dla odpowiedniej polityki gmin oraz zapewnienia przewidywalności tego systemu wsparcia w perspektywie kolejnych dziesięcioleci.
- Istnieje potrzeba systemowego wsparcia dla równoważenia dotychczasowych dysproporcji między działaniami na rzecz wytwarzania oraz użytkowania energii elektrycznej. Ukierunkowanie badań w dziedzinie elektryki na tworzenie i wdrażanie nowych, energooszczędnych technologii zasobnikowych użytkowania energii elektrycznej, przy wykorzystaniu środków pomocowych UE dla finansowania programów badawczo-wdrożeniowych oraz upowszechniania wyników u odbiorców, może mieć wielkie znaczenie dla przyspieszenia rozwoju gospodarki i społeczeństwa.

Polska strategia dla bezpiecznej przyszłości

Opracowywane w Polsce strategie, programy, założenia i prognozy energetyczne są wykonywane jako nazbyt krótkookresowe (2025-2030), z reguły przy założeniu dostępności takich lub innych geopaliw wskutek bliżej nieokreślonych odkryć zasobów własnych lub na rynkach światowych. Pomijany jest z reguły nader złożony problem wystarczalności tych zasobów w skali lokalnej oraz globalnej, wynikający z logiki elementarnej. Jeżeli zasoby geopaliw (węgla, gazu, ropy i uranu) nie są odtwarzane, a wiadomo że nie są, to są wyczerpywane, i to coraz szybciej. Ich kres jest kwestią czasu.

Jeżeli przykładowo w przemysłowych zasobach zagospodarowanych wystarczalność węgla kamiennego w Polsce jest oceniana na ok. 40 lat, to co później z krajem na węglu stojącym? Takie odpowiedzi powinny uzyskać następne pokolenia od obecnie rządzących.

Brak w Polsce wielopokoleniowej strategii energetycznej oraz skutecznej polityki jej wdrażania. Niezbędna jest ciągłość tej polityki oraz opracowanie strategicznych regulacji prawnych z zakresu wytwarzania i użytkowania energii, z uwzględnieniem wystarczalności i dostępności geopaliw oraz innych źródeł energii. Koniecznością jest zarazem systemowe preferowanie oraz skuteczne stymulowanie ekonomiczne prac badawczo-rozwojowych o problematyce jw. z zakresu bezpieczeństwa energetycznego, energetyki, elektroenergetyki i elektrotechniki oraz wdrażanie ich rezultatów do praktyki gospodarczej.

Prace nad wielopokoleniową *Polską Strategią Dla Bezpiecznej Przyszłości* powinny zostać możliwie szybko podjęte przez interdyscyplinarny zespół ekspertów, na zamówienie rządowe.

Podsumowanie

W skali globalnej, a więc i lokalnej, jesteśmy w wysoce paradoksalnej sytuacji. Mając dwa gigantyczne źródła energii: Słońce i Ziemię, nie umiemy z nich efektywnie korzystać. Mając skończone zasoby nieodnawialnych geopaliw: ropy, gazu, węgla, uranu, niebawem gazohydratów, umiemy z nich rabunkowo korzystać, bez należytej wyobraźni i troski o przyszłe pokolenia.

Istota pułapki energetycznej, w której się znaleźliśmy, wynika zarówno z naszych słabości technicznych, jak i politycznych. O przyszłości systemu cywilizacji ziemskiej zadecyduje energetyczna równowaga globalna oraz jej poziom. W obecnej sytuacji za duża jest szybkość destrukcji zasobów geopaliw, a za mała jest szybkość samoorganizowania się cywilizacji dla przetrwania. Destabilizacja energetyczna jest bardziej prawdopodobna, niż równowaga, nawet na niskim poziomie.

Bardzo szybko wzrasta zagrożenie wejścia w stadium niemożliwego do opanowania kryzysu energetycznego. W skali globalnej będzie to oznaczać m. in. narastający kryzys wytwórczy w przemyśle, transporcie, rolnictwie, rozprzestrzenianie się obszarów głodu, zjawiska deglobalizacyjne, wojny surowcowe etc.

Powaga sytuacji nie dociera do społeczności międzynarodowej, w szczególności do politycznych kręgów decydenckich, nie są więc organizowane w skali globalnej zintegrowane działania antykryzysowe, dające szansę podjęcia tego największego dla ludzkości wyzwania cywilizacyjnego i skutecznego wyeliminowania śmiertelnego zagrożenia.

Drogi do uniknięcia globalnego kryzysu energetycznego nie są obecnie znane. Konieczne są całkowicie nowe rozwiązania, wymagające wykorzystania całego geniuszu ludzkiego i zbiorowego wysiłku cywilizacyjnego, na co pozostaje coraz mniej czasu.

W praktyce problem musi zostać rozwiązany w skali globalnej przez dwa, ew. trzy następne pokolenia.

Bibliografia

- [1] <http://www.census.gov/population/international/data/idb/worldvitalerevents.php>
- [2] <http://www.poodwaddle.com/Stats/>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/World_population
<http://www.drhern.com/pdfs/doubling.pdf>
- [4] <http://www.census.gov/population/international/data/idb/informationGateway.php>
- [5] Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire CERN, "Energy, Powering Your World" (2000).
- [6] http://pl.wikipedia.org/wiki/Skala_Kardaszewa
- [7] <http://www.hydropole.ch/Hydropole/Intro/WorldE.gif>
- [8] BP Energy Outlook 2030, London, January 2011
- [9] Peak oil. Szczyt produkcji ropy naftowej. <http://www.peakoil.pl/>
- [10] Bartosik M.: Globalny kryzys energetyczny – mit czy rzeczywistość? Przegląd Elektrotechniczny. R. 84 NR 2/2008
- [11] Polski Komitet Światowej Rady Energetycznej. Raport: Sektor energii – świat i Polska. Rozwój 1971 – 2000, perspektywy do 2030 r. http://www.iea.org/Textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=911
- [12] <http://www.peakoil.pl/p/rezerwy-ropy>
- [13] Raport ORNL/TM-2003/259. Oak Ridge National Laboratory, 2003
- [14] WorldOil magazine 04.2008, http://www.worldoil.com/Magazine/magazine_contents.asp?Issue_Type=CURRENT
- [15] BP Statistical Review of World Energy. 2001, 2002, ... 2005, 2006..... 2012, 2013. www.bp.com
- [16] Oil Voice: http://www.oilvoice.com/n/Petrobras_Provides_Clarifications_on_the_Discovery_in_the_Carioca_Area/
- [17] <http://weglowodory.pl/barylka-ropy-naftowej/> dostęp 24.11.2013; za: Cambridge Energy Research Associates (CERA)
- [18] http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm
- [19] <http://biznes.onet.pl/szacunki-swiatowych-rezerw-ropy-zawyzone-o-ok-jedn,18493,3195744,3030583,53,1,news-detaj> dostęp 23.03.2010.
- [20] World oil demand 'to rise by 37%' (ang.). BBC, 2006-06-20, [dostęp 24.11.2013.
- [21] Wood J. H., Long G. R., Morehouse D. F.: Long-Term World Oil Supply Scenarios. <http://www.hubbertpeak.com/us/eia/oilsupply2004.htm>
- [22] Hirsch R. L., Bezdek R., Wendling R.: Peaking of world oil production: impact, mitigation, & risk management. 2005.
http://www.projectcensored.org/newsflash/The_Hirsch_Report_Proj_Cens.pdf
- [23] Bankier.pl POLSKI PORTAL FINANSOWY.
<http://www.bankier.pl/inwestowanie/narzedzia/tech/index.html?>
- [24] Energy Information Administration EIA. Annual Energy Outlook z kwietnia 2012 r.
- [25] http://dnbnord.blob.core.windows.net/media/content/Raport_PL.pdf
- [26] http://www.atomowe.kei.pl/index.php?Itemid=69&id=54&option=com_content&task=view

- [27] International Energy Annual (IEA) – long-term historical international energy statistics. <http://www.eia.doe.gov/iea/>
- [28] Olsza M., Ubywa zasobów i mocy – rośnie zapotrzebowanie. Węgiel górą! „Energia – Gigawat”, nr 11/2003. <http://www.gigawat.net.pl/article/articleview/276/1/33>
- [29] Rogner H.H.: An Assessment of World Hydrocarbon Resources, Annual Review of Energy and Environment, 1997
- [30] World Energy Council. Latest WEC Studies and Reports. <http://www.worldenergy.org/publications/>
- [31] Biuletyn Techniczny – Informacyjny OŁ SEP nr 3/2006 (32)
- [32] World Information Service on Energy. WISE Uranium Project. <http://www.wise-uranium.org/index.html>
- [33] Lenarczyk K.: Możliwości wykorzystania toru w energetyce. Politechnika Warszawska, 2004
- [34] Clery D.: Fusion’s Great Bright Hope. <http://www.sciencemag.org/> SCIENCE VOL 324 17 April 2009, AAAS.
- [35] WNA <http://www.world-nuclear.org/info/inf62.htm> (Updated February 2009)
- [36] USGS <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/690303.pdf>
- [37] 2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007 Uranium
- [38] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_energy_consumption.svg
- [39] Mórrígan, Tariel (2010). Peak Energy, Climate Change, and the Collapse of Global Civilization: The Current Peak Oil Crisis. 2nd edition. Global Climate Change, Human Security & Democracy. Orfalea Center for Global & International Studies. University of California, Santa Barbara.
- [40] <http://www.adv-res.com/pdf/ARI%20EIA%20Intl%20Gas%20Shale%20APR%202011.pdf>
- [41] <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
- [42] World Nuclear Association, June 2008. <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html#Appendix>
- [43] FCCG Reno Presentation RS038-00 2001. ANS Winter Meeting Reno, NV; Nov. 13, 2001
- [44] <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Uranium-Markets/>
- [45] <http://ziemianarozdrozu.pl/arttykul/940/energetyka-jadrowa-na-ile-wystarczy-uranu-27>
- [46] http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/NFC/uranium-production-cycle-redbook.html
- [47] http://poznajatom.pl/poznaj_atom/zasoby_uranu_na_swiecie,399/
- [48] Chwaszczewski S. Cykl torowy w energetyce jądrowej. <http://www.cyf.gov.pl/pdf/rej/rej7.pdf>
- [49] Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Ministerstwo Gospodarki, Warszawa, marzec 2009 r., wer. nr 3, zał. 1-5.

- [50] PIG-PIB. Ocena zasobów wydobywalnych gazów ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce. Raport pierwszy. Warszawa, marzec 2012.
- [51] <https://www.pgnig.pl/pgnig/ri/838/rr2012> Raporty roczne PGNiG z lat 2011 i 2012.
- [52] U.S. Geological Survey. Marine and Coastal Geology Program. Gas (Methane) Hydrates -- A New Frontier.
<http://marine.usgs.gov/fact-sheets/gas-hydrates/title.html>
- [53] Buzek J.: (sprawozdawca): Sprawozdanie nr (COM(2005)0119 – C6-0112/2005-2005/0044(CNS)). Komisja Przemysłu, Badań Naukowych i Energii Parlamentu Europejskiego. 04.01.2006. [54] 52004IE0955 Opinia Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego w sprawie energii termojądrowej.
- [55] Nicholas A. Krall. The Polywell; A spherically convergent ion focus concept. „Fusion Technology”. 1 (22), s. 42-49, 1992. ISSN 07481896
- [56] <http://pages.csam.montclair.edu/~kowalski/cf/index.html>;
<http://pages.csam.montclair.edu/~kowalski/cf/09sciam.html>
- [57] http://ziemianarozdrozu.pl/dl/Prof_Marek_Bartosik-SYTUACJA-ENERGETYCZNA-SWIATA-i-POLSKI.pdf
- [58] http://www.mg.gov.pl/files/upload/8437/Ocena_Hz_2012_20130327_w_ost.pdf Ministerstwo Gospodarki, Departament Strategii i Analiz. Ocena sytuacji w handlu zagranicznym w 2012 roku (na podstawie danych wstępnych GUS). Warszawa, marzec 2013 r.