

Geologiczne składowiska CO₂ fabrykami metanu?

Adam Wójcicki¹, Wojciech Brochwicz-Lewiński¹



A. Wójcicki



W. Brochwicz-Lewiński

Na tegorocznym zjeździe Japońskiej Unii Nauk o Ziemi, który odbył się w dniach 16–21.05.2009 r. w Chi-ba, zespół kierowany przez profesora Kozo Sato z Wydziału Innowacji Systemowych Uniwersytetu Tokijskiego zaprezentował wyjątkowo obiecującą metodę

pozyskiwania metanu w wyniku biokonwersji CO₂ magazynowanego w podziemnych zbiornikach (*The Mainichi Daily News*, 23.05.2009 r.). Prezentacja tej metody biokonwersji CO₂ przez mikroorganizmy *Methanothermobacter* zdaje się oznaczać sukces zespołu japońskiego w wyścigu czołowych laboratoriów z wielu krajów świata. Ponadto może mieć ona decydujące znaczenie dla uznania geologicznego składowania CO₂ za wyjątkowo obiecującą drogę do przemiany „odpadu” w surowiec do produkcji metanu i to na skalę przemysłową. Warto więc spojrzeć na całą sprawę w szerszym kontekście. Tu przedstawiamy jedynie uwagi wstępne, gdyż część kluczowych prac jest trudno osiągalna.

Sekwestracja CO₂ przez składowanie w strukturach geologicznych jest jednym z rozwiązań, które zaczynają skupiać coraz większą uwagę specjalistów poszukujących efektywnych a zarazem ekonomicznych metod ograniczenia emisji tego gazu szklarniowego. Podziemne składowanie może się okazać wyjątkowo skutecznym rozwiązaniem, gdyż od strony technicznej wiele jego aspektów zostało już dobrze opracowanych, zwłaszcza w wyniku doświadczeń firm naftowych, które od dawna z powodzeniem wykorzystują metody zatłaczania CO₂ i innych gazów oraz cieczy do zwiększenia stopnia wydobywania ropy i gazu. Dotyczy to także dobrze już poznanych aspektów bezpieczeństwa takiego składowania (Lombardi i in., 2006). Ponadto warunki geologiczne na Niżu Polskim i w północnych Niemczech czy na szelfie Morza Północnego, jak i rozległych obszarach USA zdają się być wyjątkowo korzystne dla takiego składowania i to na dużą skalę.

Należy jednak zauważyć, że idea sekwestracji poprzez składowanie w strukturach geologicznych jest nadal stosunkowo nowa i wymaga akceptacji opinii publicznej. Chodzi bowiem o to, aby projekty składowania w obszarze uznanym za korzystny, czy wręcz optymalny, nie zostały przyjęte przez lokalną społeczność jako tworzenie nowych składowisk odpadów i aby ewentualne obawy mieszkańców nie zablokowały geologicznej sekwestracji jeszcze na etapie pilotażowym. Wychodząc naprzeciw takim potencjalnym obawom mieszkańców Departament Energii USA już w 2001 r. uruchomił szeroki program grantów na badania ukierunkowane na opracowanie praktycznych metod monitoringu w celu potwierdzenia bezpieczeństwa podziemnego składowania. Program ten (*Program Area Overview*, 2001) objął również opracowanie metod znacznego

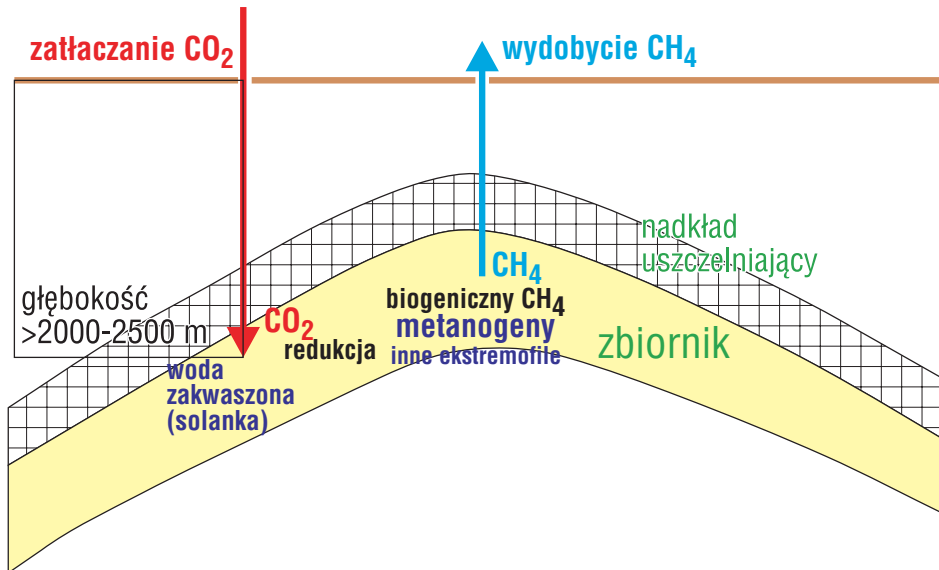
przyspieszania naturalnej biokonwersji CO₂ w metan w zbiornikach geologicznych, poprzez zastosowanie katalizatorów w postaci metanogenicznych mikroorganizmów oraz innych czynników biogeochemicznych.

Grant Departamentu Energii na badania nad biokonwersją CO₂ zdobyło konsorcjum kierowane przez *Advanced Research Int., Inc.*, w składzie którego znalazło się kilka czołowych firm naftowych. Konsorcjum to przedstawiło program pod znamionym tytułem *Metanogeniczna konwersja CO₂ w metan: przełom w technologii sekwestracji geologicznej*. Za punkt wyjścia przyjęto występowanie mikroorganizmów o dużych zdolnościach do konwersji CO₂ w strukturach geologicznych oraz dane geochemiczne i izotopowe coraz lepiej dokumentujące, że właśnie te mikroorganizmy odpowiadają za powstanie wielu naturalnych pól gazowych (porównaj np. Grossman i in., 1989; Beecy i in., 2001a, b i literatura tam cytowana). Stąd też celem projektu było wypracowanie technologii wprowadzania kultur metanogenów do geologicznych składowisk CO₂, aby doszło do ich remediacji a zarazem do powstania nowych, dużych i łatwych w eksploatacji złóż gazu (ryc. 1). Faza I tego projektu objęła: 1) rozpoznanie i zdefiniowanie wymogów biologicznych kultur metanogenów najlepszych do remediacji geologicznych składowisk CO₂; 2) ocenę warunków geochemicznych niezbędnych do pomyślnego wprowadzenia metanogenów do złóż ropy i gazu; 3) ocenę znanych amerykańskich złóż ropy i gazu w celu określenia potencjalnej skuteczności metanogenów oraz wybór najlepszych miejsc do przeprowadzenia badań laboratoryjnych i prac terenowych fazy II.

Trzeba też zwrócić uwagę na szeroki zakres prac prowadzonych przez Federalną Służbę Geologiczną Niemiec (BGR) nad produkcją metanu przez mikroorganizmy metanogeniczne w różnych środowiskach, począwszy od wysypisk odpadów komunalnych i wulkanów błotnych (ryc. 2 i 3) na powierzchni ziemi aż po pokłady węgla na dużych głębokościach oraz kominy hydrotermalne na dnie oceanów. W badaniach tych szczególnie nacisk położono na kwestie możliwego wpływu sekwestracji CO₂ w składowiskach geologicznych na rozwój mikroorganizmów oraz na pojemność zbiorników i bezpieczeństwo składowania przez długi czas. Warto odnotować, że nowe wyniki badań izotopowych metanu z pokładów węgla w Zagłębiu Ruhry wskazują, iż dzięki aktywności mikroorganizmów mogło powstać od 38 aż do 90% gazu (Thielemann i in., 2004) i proces ten może zachodzić nawet współcześnie.

W poszukiwaniu najbardziej efektywnej metody wykorzystania mikroorganizmów do przeróbki składowanego CO₂ w metan prace czołowych laboratoriów skoncentrowały się właśnie na mikroorganizmach zwanych metanogenami. Mikroorganizmy te, jeszcze dość często określane jako Archeobacteria, w świetle stwierdzonych różnic w mitochondrialnym i rybosomalnym RNA są obecnie zaliczane do domeny Archaea, wyróżnionej w klasycznym już filogenetycznym drzewie życia Carla Woese'a jako domeny oddzielne od bakterii i jądrowców, czyli eukariontów (Morrison, 2003). Mikroorganizmy domeny Archaea są ekstremofilne, czyli dostosowane do życia w warunkach, jakie uważamy za wyjątkowo nieprzyjazne dla wszelkich

¹Państwowy Instytut Geologiczny — Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa



Ryc. 1. „Fabryka metanu” w podziemnym składowisku CO₂ (wg Beecy’ego i in., 2001, uzupełniona i zmodyfikowana)

innych form życia — tłumaczy to zainteresowanie nimi badaczy początków życia na Ziemi. Przedstawiciele Archaea cechują się zdolnością do przetwarzania CO₂ i wody w metan w warunkach wysokich temperatur (do ponad 400°C) i ciśnienia, nawet w tak niegościnnym środowisku, jak hydrotermy tworzące fascynujące struktury czarnych czy brązowych kominów hydrotermalnych na dnie oceanicznym. W grę wchodzi tu mikroorganizmy czerpiące energię życiową z przeróbki wody i CO₂ (proces chemosyntezy), takie jak *Methanosarcina thermophila*, *Methanobacterium*, opisany po raz pierwszy z miejskich wysypisk *Methanother-*

mobacterium oraz *Methanothermobacter*, *Methanococcus* czy niedawno wyróżniony, skrajnie termofilny *Methanocaldococcus*. Z inną grupą przedstawicieli Archaea mieliśmy do czynienia w badaniach struktur stromatolitowych, jakie te mikroorganizmy tworzyły na granicy jury środkowej i górnej (Krumbein i in., 1988), w związku z działalnością hydroterm o temperaturach szacowanych nawet na ponad 300°C (Gołębiewska i in., 2006) oraz cenoman–turon (Brochwicz-Lewiński i in., 1988). Zdolność Archaea do wytrącania związków metali i węglanów jest tu o tyle ważna, że może doprowadzać do szybkiego zamknięcia przestrzeni poro-



Ryc. 2. Wulkan błotny emitujący płynne i gazowe węglowodory powstające w wyniku biokonwersji CO₂. Karpaty Rumuńskie. Fot. M. Krüger, Niemiecka Służba Geologiczna (BGR)



Ryc. 3. Grupa wulkanów błotnych z terenu Karpat Rumuńskich, badana przez Niemiecką Służbę Geologiczną pod kątem produkcji węglowodorów z CO₂. Fot. M. Krüger, Niemiecka Służba Geologiczna (BGR)

wej i zmniejszenia przepuszczalności osadów tworzących dany zbiornik.

Badania są skoncentrowane na poszukiwaniu odpowiedzi na pytania, które grupy Archaea okażą się najbardziej wydajne jako „producenci” metanu z CO₂ w strukturach geologicznych i jakie warunki należy zapewnić tym mikroorganizmom, aby były jak najbardziej wydajne, czyli były w stanie dokonać konwersji jak największych ilości CO₂ w jak najkrótszym czasie. W opinii zespołu prof. K. Sato, jeśli tym mikroorganizmom zapewni się temperatury co najmniej 65°C, CO₂ w dużych ilościach i w stężeniu rzędu 80% oraz odpowiednie warunki ciśnienia, to powinny one zacząć produkować metan w ilościach przemysłowych (takie warunki najprawdopodobniej panują w składowisku CO₂, w którym poziom zbiornikowy występuje na głębokości minimum 2000–2500 m, zależnie od lokalnego gradientu geotermicznego (Wójcicki, 2009b). Zespół prof. K. Sato oczekuje, że wykorzystanie metody konwersji CO₂ w metan przy udziale *Methanothermobacterium* w szczerpanych już złożach ropy naftowej Yabase w prefekturze Aki-ta w północnej części wyspy Honsiu, w których składowuje się 6,2 mln ton CO₂, da w sumie 2,25 mln ton metanu (tzn. około 3,2 mld m³) w ciągu 8 lat, czyli w ilości odpowiadającej około 8% rocznej konsumpcji gazu ziemnego w Japonii. Wielkość 3,2 mld m³ metanu odpowiada około 22% rocznego zużycia gazu ziemnego w Polsce (http://www.pgi.gov.pl/surowce_mineralne/gaz_ziemny.htm).

Należy zwrócić uwagę na opinię zespołu japońskiego, według której zapewniając odpowiednie warunki rozwoju kolonii *Methanothermobacter* można oczekiwać, że szybkość produkcji metanu w geologicznych składowiskach Yabase będzie jedynie o 3% niższa niż w warunkach laboratoryjnych. A lokalizacji zapewniających takie warunki może być znacznie więcej na terenie Wysp Japońskich i w otaczających akwenach wodnych. Teraz oczekuje się wyników prac innych zespołów, a zwłaszcza wyników porównań wydajności poszczególnych mikroorganizmów

w warunkach, jakie można im zapewnić w podziemnych składowiskach CO₂.

Nasuwa się oczywiście pytanie, co te wyniki oznaczają dla naszego środowiska, gdy prace konsorcjum Krajowego Programu *Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania* (Wójcicki, 2009a) wkroczyły na etap typowania możliwych lokalizacji do składowania CO₂ w kolejnych rejonach kraju? Przede wszystkim jak najbardziej wskazane wydaje się przeprowadzenie badań, czy i jaki jest udział mikroorganizmów z domeny Archaea w powstawaniu metanu w złożu gazu Borzęcin (gdzie od około 15 lat Instytut Nafty i Gazu wraz PGNiG S.A. prowadzą zatłaczanie CO₂ w celu wspomaganie wydobywania gazów) oraz w powstawaniu metanu z pokładów węgla w rejonie Kaniowa (gdzie prace badawcze — projekty międzynarodowe RECOPOŁ i MoVeCBM — prowadzi od wielu lat Główny Instytut Górnictwa). Te badania powinny umożliwić stwierdzenie, czy w naszych strukturach podziemnych nie ma kolonii Archaea, które w sposób efektywny mogą dokonywać konwersji CO₂ i węgla w metan. Zarazem jak najbardziej wskazane wydaje się, aby dokonując w ramach krajowego programu selekcji potencjalnych składowisk zadbać o wybranie kilku takich, które można szybko przemienić w „fabryki” metanu.

To nowe rozwiązanie powinno uczynić program podziemnego składowania CO₂ bardziej atrakcyjnym dla społeczności lokalnych. Według danych zespołów japońskich, uczulonych na sprawy zdrowia ludzi i zwierząt nawet bardziej niż na ochronę środowiska, ta nowa metoda nie powinna stanowić zagrożenia dla zdrowia a zarazem zapewni osiągnięcie głównych celów, to jest bezpiecznej sekwestracji CO₂ w połączeniu z odtwarzaniem bazy surowcowej tak ważnego surowca energetycznego, jak naturalny gaz ziemny. A już w najmniejszym stopniu nie powinniśmy obawiać się „producentów” tego gazu, czyli mikroorganizmów z domeny Archaea, gdyż gdyby nawet

te mikroorganizmy wydostały się na powierzchnię, to do rozwoju potrzebowałyby ekstremalnych warunków, czyli przede wszystkim wysokich temperatur i ciśnień.

Nie musimy obawiać się Archaea, przede wszystkim z tego względu, że ich przetrwalniki są praktycznie wszędzie. Przetrwalniki nie służą rozmnażaniu, a jedynie przetrwaniu do czasu, gdy nastaną warunki odpowiednie dla form wegetatywnych. Wiatr i woda potrafią je przetranszować na ogromne odległości i nie szkodzi im przysypanie osadem. Przedmiotem dyskusji pozostają kwestie, jak długo mogą one czekać na możliwości rozwoju (czy tysiące, czy też miliony lat) oraz jak trudne warunki potrafią przetrwać (włącznie z napromieniowaniem), co tłumaczy zainteresowanie NASA tymi właśnie mikroorganizmami.

Nowa technologia powinna zarazem umożliwić wykorzystanie już odkrytych złóż gazu ziemnego, których eksploatacja była dotychczas nieopłacalna ze względu na zbyt wysoką zawartość CO₂. Takie złoża to świetny poligon do sprawdzania wymagań poszczególnych mikroorganizmów domeny Archaea odnośnie optymalnych warunków temperatury, ciśnienia, koncentracji CO₂ i zasolenia, niezbędnych do efektywnej biokonwersji CO₂ w metan. Dziś z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że Archaea są generalnie halofilne, lecz w toku eksperymentów należy jeszcze sprawdzić, jakie warunki zasolenia wód podziemnych są preferowane przez te mikroorganizmy.

Literatura

- BEECY D., FERRELL F.M. & CAREY J.K. 2001a — Advanced concepts for CO₂ conversion, storage and reuse. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr., 46: 99–100.
- BEECY D.J., FERRELL F.M. & CAREY J.K. 2001b — Biogenic Methane: A Long-Term CO₂ Recycle Concept — www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/5a1.pdf
- BROCHWICZ-LEWIŃSKI W., GAŚIEWICZ A., SUFFCZYŃSKI S., SZATKOWSKI K., RUTKOWSKI J., TARKOWSKI R., HELIOS-RYBICKA E. & ZIMMERMANN H-D. 1988 — Cenomanian/Turonian „magic” layer in southern Poland? 3rd Int. Conference on Global Bio-events: Abrupt changes in global biota. University of Colorado, Boulder.
- GOŁĘBIEWSKA B., MATYSZKIEWICZ J., MOLENDAR. & GÓRNY A. 2006 — Hydrothermal mineralization in Middle Jurassic sandy limestones from Zalas (near Cracow, S Poland). Mineral. Pol., Sp. Papers, 28: 81–83.
- GROSSMAN E.L., COFFMAN B.K., FRITZ S.J. & WADA H. 1989 — Bacterial production of methane and its influence on ground-water chemistry in east-central Texas aquifers. Geology, 17: 495–499.
- KRUMBEIN W.E., DYER B.D., GAŚIEWICZ A., GERDES G., BROCHWICZ-LEWIŃSKI W. & SCHELLNHUBER H.J. 1988 — Microbial Mats — Iridium Events — Fossil Biospheres — An overview of geophysiology. Terra Cognita, 8: 227.
- LOMBARDI S., ALTUNINA L.K. & BEAUBIEN S.E. (eds.) 2006 — Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide: International Approaches to Reduce Anthropogenic Greenhouse Emissions. Springer, Dordrecht.
- Microbial** production and degradation of hydrocarbons — Research fields in the focus area energy resources — www.bgr.bund.de/.../Energ_Mikrobielle_Bildung_Abbau_en.html
- MORRISON D. 2003 — Carl Woese and new perspectives on evolution. NASA Astrobiology Institute, NAI Features, Archives — http://nai.nasa.gov/new_stories/news_detail.cfm?ID=274; <http://nai.arc.nasa.gov/library/images/news>
- Program** Area Overview, DoE (Dept. of Energy, US), 2001 — www.er.doe.gov/sbir/solicitations/16-BE58.htm
- The Mainichi** Daily News, 23.05.2009 — Tokyo researchers successfully convert CO₂ into methane using bacteria — <http://www.carbonoffsetsdaily.com/news-channels/asia/tokyo-researchers-successfully-convert-co2-into-methane-using-bacteria-7876.htm>
- THIELEMANN T., CRAMER B. & SCHIPPERS A. 2004 — Coalbed methane in the Ruhr basin, Germany: A renewable energy source? Organic Geochem., 35: 1537–1549.
- WÓJCICKI A. 2009a — Uwięzić dwutlenek! Prz. Gazow., 20: 23–25.
- WÓJCICKI A. (red.) 2009b — Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. Raport merytoryczny nr 1: Segment I, rejon Bełchatów — <http://skladowanie.pgi.gov.pl>

Praca wpłynęła do redakcji 21.09.2009 r.
Po recenzji akceptowano do druku 06.10.2009 r.