

Radosław Tarkowski*, Barbara Uliasz-Misiak*, Ewa Szarawarska*

METODY MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO₂

1. WSTĘP

Rosnąca koncentracja CO₂ w atmosferze i jej wpływ na zmiany klimatu leżą u podstaw badań zmierzających do ograniczenia emisji tego gazu [17]. Składowanie w głębokich formacjach geologicznych dwutlenku węgla emitowanego w wyniku spalania paliw oraz przez przemysł jest rozważane jako metoda redukcji emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Wzrastające zainteresowanie tym sposobem unieszkodliwienia CO₂ wymaga rozwinięcia nowych technologii (między innymi oddzielania CO₂ z gazów spalinowych/przemysłowych) oraz oszacowania, czy może być ono wdrożone bezpiecznie i efektywnie.

Jako miejsca podziemnego składowania rozważane są złoża węglowodorów, pokłady węgla, głębokie poziomy wodonośne i inne [7]. Złoża węglowodorów są odpowiednie do składowania CO₂, gdyż zostały przez naturę sprawdzone jako szczelne pułapki. W przypadku składowania w głębokich poziomach wodonośnych szczególną uwagę zwraca się na problem szczelności geologicznej tych struktur. Składowanie CO₂ w pokładach węgla wykorzystuje chemiczne wiązanie CO₂ z matrycą skalną. We wszystkich przypadkach istotne jest bezpieczeństwo składowania. Zależy ono od rodzaju pułapki (struktury geologicznej), procesów zachodzących w złożu, jak również stanu technicznego infrastruktury przeznaczonej do wykorzystania przy składowaniu CO₂. Niezależnie od miejsca podziemnego składowania CO₂ mogą występować wycieki gazu ze składowiska dwutlenku węgla poprzez nieszczelności w otworach zatłaczających i obserwacyjnych lub przez naturalne drogi migracji, np. uskoki [12]. Przypuszcza się, że po kilkuset lub po kilku tysiącach lat część, a może nawet cały CO₂, rozpuści się w płynach złożowych, część CO₂ wejdzie w reakcje z minerałami i utworzy matrycę skalną. Po rozpuszczeniu lub przereagowaniu, dwutlenek węgla nie będzie migrował ku powierzchni nawet przy braku dostatecznego uszczelnienia. Te dwa podstawowe założenia są podstawą dla bezpiecznego podziemnego składowania CO₂. Ich sprawdzenie wymaga kontroli poprzez monitoring, poczynając od momentu wy-

* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

boru miejsca podziemnego składowania CO₂, a kończąc na monitoringu po zakończeniu procesu składowania i zamknięciu składowiska.

Monitoring zatłaczania i składowania CO₂ prowadzony jest przy wykorzystaniu różnych metod. Stosowane są metody geofizyczne, metody geochemiczne i inne. Ich zadaniem jest udokumentowanie jak największej ilości procesów dynamicznych związanych z wprowadzaniem CO₂ do głębokich warstw skalnych.

2. CELE MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO₂

Proces podziemnego składowania CO₂ niesie za sobą różnego rodzaju zagrożenia dla ludzi i środowiska w skali globalnej lub lokalnej. Monitoring podziemnego składowania CO₂ jest podstawą dla pomyślnego przeprowadzenia całego zabiegu. Organy nadzorcze będą wymagały zapewnienia, ażeby podziemne składowanie było bezpieczne i nie spowodowało znaczących zmian w środowisku [2].

Celem monitoringu podziemnego składowania CO₂ jest przede wszystkim śledzenie lokalizacji chmury gazu pod ziemią, kontrola czy otwory w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu nie wykazują nieszczelności, weryfikacja ilości dwutlenku węgla zatłoczonego pod ziemię, kontrola innych parametrów związanych z zatłaczaniem. Pozostałe cele to kontrola jakości wód podziemnych, ekosystemów i bezpieczeństwa ludzi na terenach potencjalnie narażonych na niebezpieczne koncentracje CO₂, powstałe w wyniku wycieku z miejsca składowania.

Przeprowadzenie bezpiecznego i efektywnego składowania CO₂ wymaga rozważenia szerokiego zakresu zagadnień dotyczących bezpieczeństwa i ochrony środowiska.

Najważniejsze spośród nich to:

- rozprzestrzenienie,
- lokalizacja i charakter wycieków CO₂ z miejsca składowania,
- prowadzenie efektywnej kontroli urządzeń zatłaczających, prędkości zatłaczania, ciśnień głowicowych i złożowych.

Pierwsze z nich wymagają monitorowania pod powierzchnią ziemi przemieszczania się chmury CO₂. W przypadku wycieku CO₂ ze struktury złożowej konieczne jest zastosowanie monitoringu strumienia CO₂ i badania jego koncentracji na powierzchni terenu. W przypadku drugiego zagadnienia konieczna jest kontrola efektywności zatłaczania, stanu otworu zatłaczającego, prędkości zatłaczania, ciśnienia na głowicy i ciśnienia złożowego [2].

Dodatkowo, oprócz wymienionych czynników powinno się monitorować inne parametry pomocne przy składowaniu CO₂ lub mogące określić w przypadku wycieku jego źródło, opracować schemat naprawczy i ocenić wpływ zatłaczania CO₂ na środowisko naturalne.

Dotyczy to:

- oszacowania efektywności wykorzystania objętości składowania;
- dostarczenia informacji o postępie rozpuszczania i mineralnego wiązania CO₂;
- zlokalizowania uskoków i innych struktur, przez które może wyciekać CO₂;
- określenia jakości wód podziemnych, wykrycia i monitorowania koncentracji CO₂ w strefie wadycznej i w glebie;
- monitorowania wpływu zatłaczania CO₂ na ekosystem.

Znajomość tych zagadnień pozwoli na bezpieczniejsze i efektywniejsze podziemne składowanie CO₂.

3. METODY MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO₂

Technologie pomiarowe stosowane do monitoringu podziemnego składowania CO₂ są zapożyczone z innych zastosowań włączając w to przemysł naftowy, magazynowanie gazu ziemnego, składowanie odpadów ciekłych i niebezpiecznych w formacjach geologicznych, monitoring wód podziemnych, badania ekosystemów i inne [3, 4]. Do monitoringu zastosować można bezpośrednie pomiary stężenia CO₂ w powietrzu, glebie, wodach podziemnych oraz pośrednie mające na celu lokalizację tego gazu w strukturze [2].

3.1. Pomiary parametrów złożowych i eksploatacyjnych

W monitoringu podziemnego zatłaczania CO₂ konieczne jest prowadzenie pomiarów parametrów złożowych i eksploatacyjnych w tym: prędkości zatłaczania CO₂, ciśnienia i temperatury na głowicy oraz w złożu. Pomiary te są powszechnie stosowane w przemyśle naftowym [5].

3.2. Bezpośrednie metody pomiarowe dla detekcji CO₂

Bezpośrednie pomiary CO₂ w powietrzu, wodzie lub glebie są istotną częścią monitoringu. Monitoruje się koncentrację CO₂ w powietrzu glebowym w pobliżu otworu zatłaczającego lub otworów zlikwidowanych. W przypadku istnienia przesłanek wycieku CO₂ ze struktury i jej migracji ku powierzchni, koncentracja CO₂ powinna być monitorowana w strefie wadycznej i glebie [16].

Sensory do pomiaru CO₂ w powietrzu

Pomiary stężenia CO₂ wykonywane są w powietrzu atmosferycznym i glebowym. Zwykle połowe pomiary stężenia CO₂ w powietrzu glebowym lub strumieniu z gleby wykonuje się przy wykorzystaniu prostych analizatorów IR, absorbujących promieniowanie bliskie podczerwone oraz czujników chemicznych [12, 15]. Pomiary te są szybkie i można nimi objąć znaczne obszary. Jednym ze sposobów monitorowania podziemnego składowiska CO₂ może być zdalne wykrywanie wycieków CO₂ do atmosfery poprzez satelity. Prowadzi się badania nad zastosowaniem do zdalnej detekcji laserów lotniczych LIDAR i DIAL [2].

Metody geochemiczne i wskaźnikowe

Metody geochemiczne i wskaźnikowe są wykorzystywane dla bezpośredniego monitoringu przemieszczania się CO₂ pod powierzchnią ziemi i poznania reakcji zachodzących pomiędzy CO₂ a płynami złożowymi i minerałami. Wykonuje się badania geochemiczne próbek płynów pobieranych bezpośrednio próbnikami ze złoża lub na głowicy otworu. W próbkach oznacza się jony główne, pH, alkaliczność, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO₂ i jego izotopy, a wyniki porównuje się z pomiarami wykonanymi przed procesem zatłaczania (badania tzw. tła) [8, 9].

Naturalne wskaźniki (izotopy C, O, H i gazy szlachetne) mogą być źródłem informacji na temat przemieszczania się dwutlenku węgla pod powierzchnią ziemi oraz reakcji zachodzących w formacji (wytrącanie minerałów, rozpuszczanie skały zbiornikowej oraz zmiany jej przepuszczalności i porowatości) [2, 17]. Izotop węgla (^{13}C) wykorzystywany jest do śledzenia ilości zatłoczonego CO_2 . Stosunek izotopów $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ może wskazać pochodzenie CO_2 , gdyż gaz antropogeniczny różni się składem izotopowym od tego znajdującego się w atmosferze.

Do oszacowania zakresu, w jakim CO_2 reaguje z płynami złożowymi i minerałami, wprowadza się wskaźniki – związki chemiczne (np. SF_6) mające zerową lub bardzo niską koncentrację pod powierzchnią ziemi. Są one wykrywalne przy niskich koncentracjach, charakteryzują się stałymi parametrami w warunkach złożowych, są bezpieczne dla środowiska oraz łatwo wykrywalne. Dla przykładu monitoring geochemiczny prowadzony na złożu Weyburn od 2000 r. wykazał znaczne zmiany w składzie chemicznym i izotopowym, zmianę pH o 0,5 wzrost alkaliczności w wyniku rozpuszczenia matrycy skalnej [7].

3.3. Pośrednie metody pomiarów detekcji chmury CO_2

Do pośrednich metod monitoringu zaliczamy:

- monitoring geofizyczny (profilowanie otworowe, sejsmika, grawimetria),
- pomiary deformacji powierzchni (przy użyciu inklinometru i bazujące na pomiarach satelitarnych).

Użyteczność tych metod określona jest przez próg wykrywalności CO_2 i możliwość oceny ilościowej.

Największe doświadczenia dotyczące monitoringu zatłaczania CO_2 zgromadzono w ramach projektu Sleipner. Stwierdzono, że dobre efekty monitorowania chmury CO_2 daje wykorzystanie trójwymiarowych badań sejsmicznych [1].

Metody geofizyczne

Monitoring wykorzystujący techniki geofizyczne pozwala na kontrolowanie znacznych obszarów.

Profilowania otworowe

W przypadku geologicznego składowania CO_2 profilowania otworowe wykonywane są przede wszystkim w celu stwierdzenia stanu otworu i zlokalizowania uszkodzeń jako potencjalnych miejsc wycieku CO_2 . Są to jednak metody o małej dokładności, nie zawsze pozwalające na wykrycie niewielkich uszkodzeń.

Metody sejsmiczne. Metody sejsmiczne umożliwiają zlokalizowanie chmury CO_2 . Do monitoringu podziemnego składowania stosuje się zdjęcia sejsmiczne 3-D wykonywane w odstępach czasowych, sejsmikę międzyotworową i monitoring pasywny. Wpływ CO_2 na sygnał sejsmiczny jest znaczny, obecność gazu przejawia się wzrostem współczynnika odbicia. Poniżej chmury CO_2 obserwuje się efekt *push down* wywołany mniejszą prędkością fali w skale nasyconej gazem w stosunku do tej nasyconej wodą. Zdjęcia sejsmiczne wykonane przed i w trakcie zatłaczania CO_2 do formacji Utsira na złożu Sleipner potwierdziły zmianę współczynnika odbicia. Ponieważ wpływ CO_2 na obraz sejsmiczny jest duży, dlatego badania sejsmiczne wykonywane w odstępach czasu są odpowiednią techniką geofizyczną służącą do monitoringu zatłaczania CO_2 [1].

Sejsmika międzyotworowa zastosowana do monitoringu CO₂ pozwala prześledzić zmiany własności zbiornika w małej skali. Pomiary wykonywane w odstępach czasu pozwalają pokazać zmiany zachodzące w okolicy otworów przed, w trakcie i po zatłoczeniu CO₂ oraz oszacować zmiany ciśnienia, nasycenia wodą i nasycenia dwutlenkiem węgla [10].

Sejsmiczny monitoring pasywny jest technologią mającą na celu zobrazowanie reakcji zbiornika na zatłaczanie CO₂. Zatłaczanie CO₂ powoduje deformację skał. Przykład złoża Weyburn dowodzi, że pasywny monitoring sejsmiczny może uwidocznić dyskretne zdarzenia sejsmiczne w czasie zatłaczania [11].

Międzyotworowy elektromagnetyczny monitoring (EM) sekwestracji CO₂. Metoda międzyotworowych zdjęć elektromagnetycznych wykorzystuje różnice w indukowanych polach elektromagnetycznych, w różnych materiałach. Skały zawierające wodę przewodzą prąd znacznie lepiej niż te wypełnione ropą. EM jest uzupełnieniem zdjęć sejsmicznych, które mają ograniczoną zdolność rozróżniania ropy i innych cieczy. Zdjęcia sejsmiczne są najlepsze do mapowania struktury, podczas gdy metody EM są bardziej wrażliwe na różne płyny złożowe.

Elektryczna tomografia opornościowa (ERT). W związku z tym, że dwutlenek węgla ma wysoką oporność, metody elektryczne są odpowiednie dla monitoringu składowania CO₂ w formacjach zawierających wodę złożową. Rejestruje ona własności elektryczne, co pozwala na charakterystykę złoża oraz monitoring podpowierzchniowej wędrówki płynów złożowych, w tym CO₂ (np. wyciek z podziemnych zbiorników). Modelowania numeryczne i badania laboratoryjne wykazały, że zmiany w oporności, np. w wyniku migracji CO₂ w złożu, mogą być zobrazowane przy wykorzystaniu ERT [13].

Monitoring grawimetryczny. Powtarzane, bardzo precyzyjne pomiary mikrogravimetryczne mogą dostarczyć dokładnych informacji o rozkładzie gęstości i masy CO₂. Dzięki tym badaniom można stwierdzić ucieczkę dwutlenku węgla przez nadkład skały. Metoda ta pozwala uzyskać również informację dotyczącą rozpuszczania CO₂ w wodzie złożowej po zakończeniu zatłaczania [6].

Deformacje powierzchni terenu, monitoring satelitarny i lotniczy

Postęp w technice satelitarnych zobrazowań dostarcza nowych możliwości do wykorzystania deformacji powierzchni terenu i obrazów spektralnych do pośredniego mapowania migracji CO₂. Zatłoczony pod powierzchnię dwutlenek węgla może spowodować wzrost ciśnienia formacji do takiego stopnia, że wywoła to niewielkie wygięcie powierzchni ziemi. Deformacje te mogą być mierzone przez satelitarne lub lotnicze systemy radarów (InSAR) [15]. Rozwój tych technologii może dostarczyć użytecznych i stosunkowo niedrogich metod monitoringu migracji CO₂ na dużych powierzchniach i w zróżnicowanych ekosystemach.

LITERATURA

- [1] Arts R., Eiken O., Chadwick A., Zweigel P., Van der Meer L., Zinszer B.: *Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time lapse seismic data*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto Japan, 1–4 October 2002
- [2] Benson S.M., Myer L.: *Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide*. IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, 2000

- [3] Benson S.M., Apps J., Hepple R., Lippmann M., Tsang C.F., Lewis C.: *Health, Safety, and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues*. 6 International GHG Control Technology Kyoto, Japan, 1–4 October, 2002
- [4] Benson S.M., Hepple R., Apps J., Tsang C.F., Lippmann M.: *Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geologic Formations*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51170, 2002
- [5] Brown G.A., Hartog A.: *Optical Fiber Sensors in Upstream. Oil and Gas*. Journal of Petroleum Technology 2002
- [6] Buller A., Karstad O., de Koeijer G.: *Carbon dioxide. Capture, Storage and Utilization*. Research & Technology Memoire, No. 5, 2004
- [7] Emberley S., Hutcheon I., Shevalier M., Durocher K., Gunter W.D., Perkins E.H.: *Geochemical monitoring of fluid – rock interaction and CO₂ storage at the Weyburn CO₂ injection enhanced oil recovery site, Saskatchewan, Canada*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto Japan, 1–4 October 2002
- [8] Gunter W.D., Chalaturnyk R.J., Scott J.D.: *Monitoring of Aquifer Disposal of CO₂: Experience from Underground Gas Storage and Enhanced Oil Recovery*. 4 International GHG Control Technology, Interlaken, Switzerland
- [9] Gunter W.D., Perking E.: *Geochemical Monitoring of CO₂ Enhanced Oil Recovery*. Proceedings of the NETL Workshop on Carbon Sequestration Science, 2001 <http://www.netl.doe.gov/>
- [10] Hoversten G.M., Gritto R., Daley T.M., Majer E.L., Myer L.R.: *Crosswell seismic and electromagnetic monitoring of CO₂ Sequestration*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto Japan, 1–4 October 2002
- [11] Maxwell S.C., White D.J., Fabriol H.: *Passive Seismic Imaging of CO₂ Sequestration at Weyburn*. Technical Abstracts, 74th Ann. Internat. Mtg. Soc. of Expl. Geophys. 2004
- [12] Moberg R., Stewart D.B., Stachniak D.: *The IEA Weyburn CO₂ monitoring and storage project*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto Japan, 1–4 October 2002
- [13] Newmark R.L., Ramirez A.L., Daily W.D.: *Monitoring carbon dioxide sequestration using electrical resistance tomography (ERT): a minimally invasive method*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto Japan, 1–4 October 2002
- [14] Oldenburg C.M., Lewicki J.L.: *Leakage and seepage in the near-surface environment: an integrated approach to monitoring and detection*. 7 International GHG Control Technology, Vancouver, Canada, 5–9 September 2004
- [15] Shuler P.J., Tang Y.: *Atmospheric CO₂ monitoring systems – a critical review report of available techniques and technology gaps*. Report for SMV group, The CO₂ Capture Project (CCP), luty 2002
- [16] Strutt M.H., Beaubien S.E., Baubron J.C., Brach M., Cardellini C., Granieri R., Jones D.G., Lombardi S., Penner L., Quattrocchi F., Voltattorni N.: *Soil Gas as a Monitoring Tool of Deep Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Preliminary Results from the Encana EOR Project in Weyburn, Saskatchewan, Canada*. 6 International GHG Control Technology, Kyoto, Japan, 1–4 October, 2002
- [17] White D.J., Burrowes G., Hajnal Z., Hirsche K., Hutcheon I., Majer E., Rostron B., Whittaker S.: *Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs*. The International Energy Agency Weyburn pilot project. GSA Today, 14/7, July 2004