

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

## **METODY MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub>**

### **1. WSTĘP**

Rosnąca koncentracja CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> wymaga rozwinięcia nowych technologii (między innymi oddzielania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> w pokładach węgla wykorzystuje chemiczne wiązanie CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Niezależnie od miejsca podziemnego składowania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, rozpuści się w płynach złożowych, część CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Ich sprawdzenie wymaga kontroli poprzez monitoring, poczynając od momentu wy-

---

\* Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

boru miejsca podziemnego składowania CO<sub>2</sub>, a kończąc na monitoringu po zakończeniu procesu składowania i zamknięciu składowiska.

Monitoring zatłaczania i składowania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> do głębokich warstw skalnych.

## 2. CELE MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub>

Proces podziemnego składowania CO<sub>2</sub> niesie za sobą różnego rodzaju zagrożenia dla ludzi i środowiska w skali globalnej lub lokalnej. Monitoring podziemnego składowania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, powstałe w wyniku wycieku z miejsca składowania.

Przeprowadzenie bezpiecznego i efektywnego składowania CO<sub>2</sub> wymaga rozważenia szerokiego zakresu zagadnień dotyczących bezpieczeństwa i ochrony środowiska.

Najważniejsze spośród nich to:

- rozprzestrzenienie,
- lokalizacja i charakter wycieków CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. W przypadku wycieku CO<sub>2</sub> ze struktury złożowej konieczne jest zastosowanie monitoringu strumienia CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> lub mogące określić w przypadku wycieku jego źródło, opracować schemat naprawczy i ocenić wpływ zatłaczania CO<sub>2</sub> na środowisko naturalne.

Dotyczy to:

- oszacowania efektywności wykorzystania objętości składowania;
- dostarczenia informacji o postępie rozpuszczania i mineralnego wiązania CO<sub>2</sub>;
- zlokalizowania uskoków i innych struktur, przez które może wyciekać CO<sub>2</sub>;
- określenia jakości wód podziemnych, wykrycia i monitorowania koncentracji CO<sub>2</sub> w strefie wadycznej i w glebie;
- monitorowania wpływu zatłaczania CO<sub>2</sub> na ekosystem.

Znajomość tych zagadnień pozwoli na bezpieczniejsze i efektywniejsze podziemne składowanie CO<sub>2</sub>.

### **3. METODY MONITORINGU PODZIEMNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub>**

Technologie pomiarowe stosowane do monitoringu podziemnego składowania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> konieczne jest prowadzenie pomiarów parametrów złożowych i eksploatacyjnych w tym: prędkości zatłaczania CO<sub>2</sub>, ciśnienia i temperatury na głowicy oraz w złożu. Pomiary te są powszechnie stosowane w przemyśle naftowym [5].

#### **3.2. Bezpośrednie metody pomiarowe dla detekcji CO<sub>2</sub>**

Bezpośrednie pomiary CO<sub>2</sub> w powietrzu, wodzie lub glebie są istotną częścią monitoringu. Monitoruje się koncentrację CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w pobliżu otworu zatłaczającego lub otworów zlikwidowanych. W przypadku istnienia przesłanek wycieku CO<sub>2</sub> ze struktury i jej migracji ku powierzchni, koncentracja CO<sub>2</sub> powinna być monitorowana w strefie wadycznej i glebie [16].

##### **Sensory do pomiaru CO<sub>2</sub> w powietrzu**

Pomiary stężenia CO<sub>2</sub> wykonywane są w powietrzu atmosferycznym i glebowym. Zwykle połowe pomiary stężenia CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> może być zdalne wykrywanie wycieków CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> pod powierzchnią ziemi i poznania reakcji zachodzących pomiędzy CO<sub>2</sub> 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, CO<sub>2</sub> 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 ( $^{13}\text{C}$ ) wykorzystywany jest do śledzenia ilości zatłoczonego  $\text{CO}_2$ . Stosunek izotopów  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  może wskazać pochodzenie  $\text{CO}_2$ , gdyż gaz antropogeniczny różni się składem izotopowym od tego znajdującego się w atmosferze.

Do oszacowania zakresu, w jakim  $\text{CO}_2$  reaguje z płynami złożowymi i minerałami, wprowadza się wskaźniki – związki chemiczne (np.  $\text{SF}_6$ ) 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 $\text{CO}_2$

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  $\text{CO}_2$  i możliwość oceny ilościowej.

Największe doświadczenia dotyczące monitoringu zatłaczania  $\text{CO}_2$  zgromadzono w ramach projektu Sleipner. Stwierdzono, że dobre efekty monitorowania chmury  $\text{CO}_2$  daje wykorzystanie trójwymiarowych badań sejsmicznych [1].

#### Metody geofizyczne

Monitoring wykorzystujący techniki geofizyczne pozwala na kontrolowanie znacznych obszarów.

#### Profilowania otworowe

W przypadku geologicznego składowania  $\text{CO}_2$  profilowania otworowe wykonywane są przede wszystkim w celu stwierdzenia stanu otworu i zlokalizowania uszkodzeń jako potencjalnych miejsc wycieku  $\text{CO}_2$ . Są to jednak metody o małej dokładności, nie zawsze pozwalające na wykrycie niewielkich uszkodzeń.

**Metody sejsmiczne.** Metody sejsmiczne umożliwiają zlokalizowanie chmury  $\text{CO}_2$ . Do monitoringu podziemnego składowania stosuje się zdjęcia sejsmiczne 3-D wykonywane w odstępach czasowych, sejsmikę międzyotworową i monitoring pasywny. Wpływ  $\text{CO}_2$  na sygnał sejsmiczny jest znaczny, obecność gazu przejawia się wzrostem współczynnika odbicia. Poniżej chmury  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  do formacji Utsira na złożu Sleipner potwierdziły zmianę współczynnika odbicia. Ponieważ wpływ  $\text{CO}_2$  na obraz sejsmiczny jest duży, dlatego badania sejsmiczne wykonywane w odstępach czasu są odpowiednią techniką geofizyczną służącą do monitoringu zatłaczania  $\text{CO}_2$  [1].

Sejsmika międzyotworowa zastosowana do monitoringu CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> oraz oszacować zmiany ciśnienia, nasycenia wodą i nasycenia dwutlenkiem węgla [10].

Sejsmiczny monitoring pasywny jest technologią mającą na celu zobrazowanie reakcji zbiornika na zatłaczanie CO<sub>2</sub>. Zatłaczanie CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.** 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 CO<sub>2</sub> w formacjach zawierających wodę złożową. Rejestruje ona własności elektryczne, co pozwala na charakterystykę złoża oraz monitoring podpowierzchniowej wędrówki płynów złożowych, w tym CO<sub>2</sub> (np. wyciek z podziemnych zbiorników). Modelowania numeryczne i badania laboratoryjne wykazały, że zmiany w oporności, np. w wyniku migracji CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. Dzięki tym badaniom można stwierdzić ucieczkę dwutlenku węgla przez nadkład skały. Metoda ta pozwala uzyskać również informację dotyczącą rozpuszczania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> storage at the Weyburn CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>: 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> monitoring systems – a critical review report of available techniques and technology gaps*. Report for SMV group, The CO<sub>2</sub> 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