

1 石炭の地下ガス化 (UCG) に関する室内実験と 現場試験結果について

室蘭工業大学 いたくらけんいち ○板倉賢一, すーふぁーちあん 蘇 発 強, ふくやまじゆんき 福山淳基, いいだりようすけ 飯田亮介
室蘭工業大学 よしだゆたか 吉田豊, ごとうたつひこ 後藤龍彦
北海道大学 おおがこうたろう 大賀光太郎
NPO 地下資源イノベーションネットワーク でぐちこうた 出口剛太

1. はじめに

石炭の地下ガス化 (UCG : Underground Coal Gasification) などにより回収可能なわが国の石炭量は、褐炭も含めると約 300 億トンと見積もられている¹⁾。こうした地下の未利用石炭資源を環境に負荷を与えずに回収する方法として、UCG が有望であり、世界各国で稼働あるいは計画されている。しかしながら、わが国には UCG の実績が無く、さらに炭田が都市部に近接しているため、もし地盤沈下や地下水汚染、ガスの地表漏洩などが起きれば、その被害は甚大である。

本研究では、わが国の未利用石炭資源を安全に、環境に負荷を与えず、効率的に活用できる UCG 技術の開発を目指している。これまでに、石炭ブロックを用いた室内 UCG モデル実験を行ってきた。その結果、石炭に着火すると、その周辺の石炭がガス化すると同時に内部に破壊が進展し、その表面積の拡大に伴いガス化領域が拡大、移動することがわかった。すなわち、石炭の燃焼、破壊、ガス化の連鎖である。従って、UCG に伴う破壊の進展を AE/MS (Acoustic Emission/Microseismicity) 計測などにより把握できれば、ガス化領域を推定できる^{2) 3)}。しかし、効率的で安全な UCG 技術を確立するためには、破壊進展を監視しながら、ガス化領域の拡大や移動を制御する必要がある。地下ガス化の制御は、従来、ガス化領域へ供給する空気や酸素、水蒸気の量や割合を変えることで行ってきた。今回は、石炭の燃焼領域に酸素を供給したときの発生ガスおよび発生エネルギーに注目して室内実験および小規模な現場実験を行ったので、その結果について報告する。

2. 室内実験結果

Fig.1 は、石炭ブロックを用いた代表的な UCG モデル実験の計測システムを表している。釧路コールマイン産の石炭ブロック (本層炭) をペール缶内に入れ、耐熱セメントを流し込んでモデルを作製した。石炭ブロック内に L 字型のリンキング孔 (直径約 12mm) を設け、垂直孔の孔底を着火点とした。石炭ブロック内に達するように熱電対と AE 計測用ウェーブガイドを配置した。供給ガ

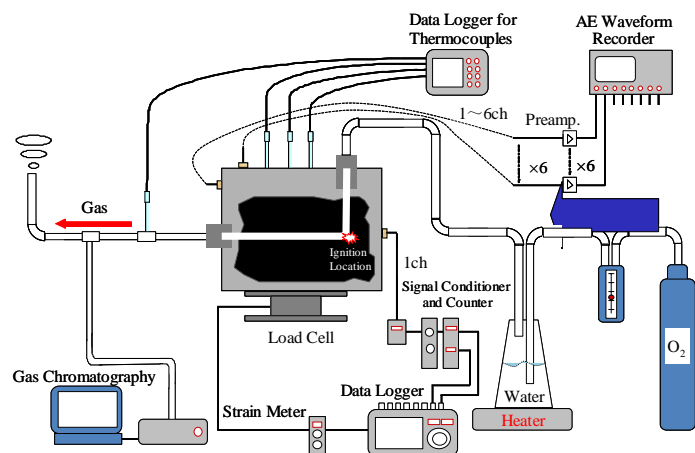


Fig.1 室内実験の計測システム

スとしては空気や水蒸気も可能であるが、今回は純酸素を用い、途中で水蒸気も加えた。また、発生ガスの濃度を、ガスクロマトグラフィで測定した。

Fi. 2 は、AE 活動と熱電対の温度の経時変化である。着火後 AE 活動は最も活発になり、その後断続的に AE が発生している。温度の変化を見ると、垂直孔底に最も近い CH2 の温度が最初に上がり、その後、孔底近傍の CH1 と CH3 が、続いて水平孔に沿った CH5 と CH8 が上昇している。すなわち、燃焼、ガス化領域は垂直孔の孔底から水平孔に沿って拡大、移動したと考えられる。また、規模の比較的大きな AE が発生すると、温度が上昇あるいは低下している箇所がある。すなわち、破壊進展に伴い、燃焼、ガス化領域が拡大、移動していると考えられる³⁾。

Fig. 3 は、実験中に生成した各種ガスの濃度変化である。初期には CO の発生濃度が高く、酸素注入量を 5L/min に固定してからは徐々に減少していった。CO₂ は、逆の反応を示し、終盤では完全燃焼に近い状態になった。また、3 時間 10 分頃に水蒸気を供給したが、CO が減少したものの、大きな変化は見られなかった。各ガス濃度から求めた発熱量の平均は、11.3MJ/m³であった。

3. 現場試験結果

Fig. 4 に現場実験の概要を示す。現場試験は、株式会社砂子組三笠露天坑で実施した。炭層露頭部から炭層傾斜（約 25 度）に沿って直径 42mm のリンキング孔を約 4m 穿孔し、地表からの垂直孔（注入孔）と孔底で連結した。着火箇所は、この孔底である。着火後、一定流量（20L/min）で酸素を注入した。

燃焼に伴う石炭層の温度変化を観測するために、リンキング孔に沿って孔の上部 10cm の位置に熱電対を 7 本配置した。また、AE センサ（加速度計）をリンキング孔の周囲に 8 個配置した。室内実験と同様、生成ガスの各種成分濃度をガスクロマトグラフィにより計測した。

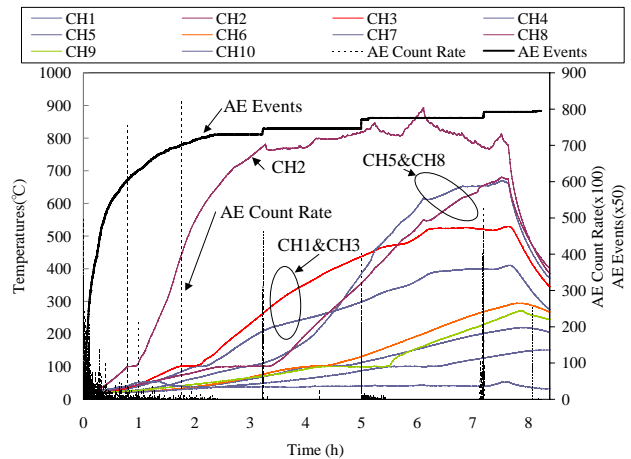


Fig. 2 AE 活動と温度変化

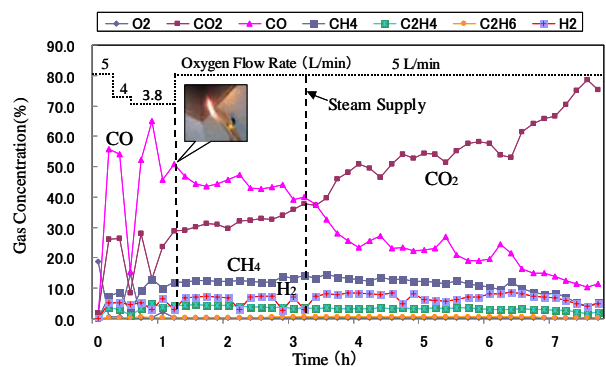


Fig. 3 生成ガスの濃度変化

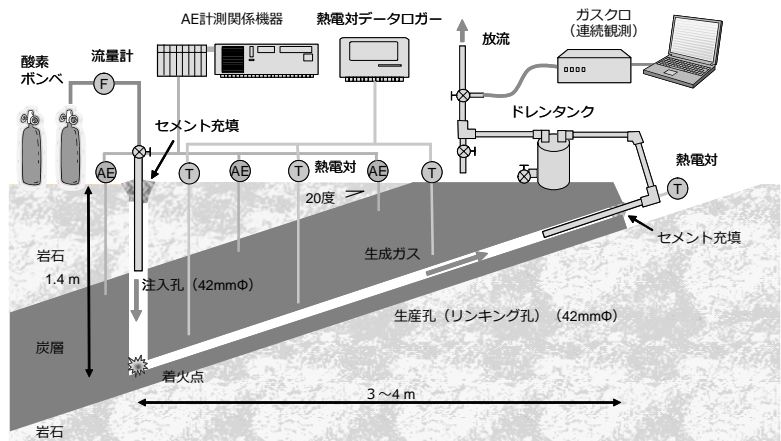


Fig. 4 現場試験のシステム概要

Fig. 5 に、実験開始から終了までの熱電対により計測した温度変化を示す。図中の写真は、サーモカメラで撮影した地表面の温度分布の変化である。開始直後に生成ガスの温度 (CH8) が約 100°C に上昇し、石炭への着火を確認した。リンクング孔周辺で最初に温度変化が認められたのは着火源から 60cm 離れた CH4 で、その後、CH1、CH3 の順に温度上昇が認められた。この時期、図には示していないが AE 活動も活発化した。CH4 の温度は 10 時間が経過した後に急激に上昇し、23 時間経過後には 1,600°C に達した。従って、熱電対を埋設した箇所の中では着火源から離れた CH4 付近に最も早く燃焼領域が到達し、熱電対を埋設した箇所にまで燃焼領域が拡大したものと考えられる。着火源に最も近く、酸素の流れの方向に位置する CH2 の温度は、実験開始後 25 時間経過後も 100°C 程度であり、燃焼領域の広がり不均一であったと推測される。また、20 時間経過以降 CH1 の温度が急上昇しているが、酸素の流れとは反対側にも燃焼領域が拡大したことを示している。サーモカメラによる地表面温度分布写真からは、燃焼領域が徐々に拡大している様子が分かる。

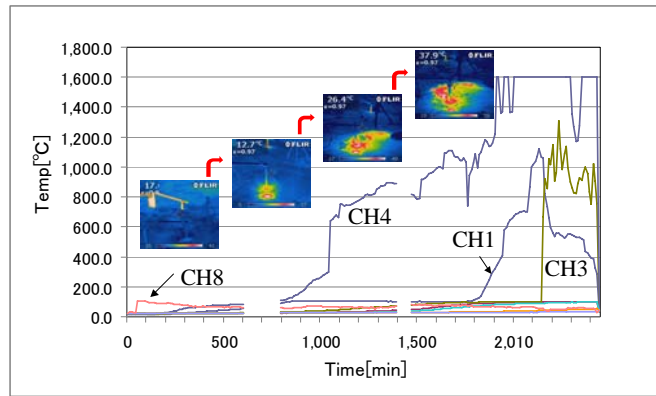


Fig. 5 熱電対の温度変化と地表面温度分布

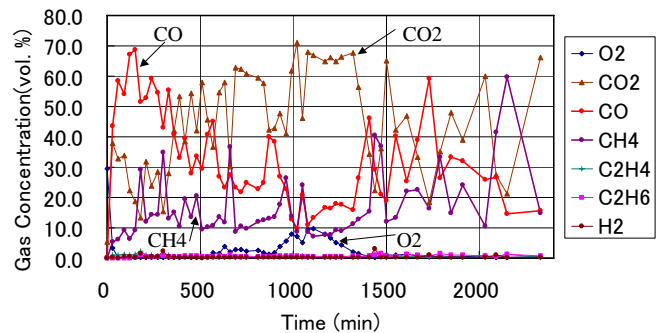


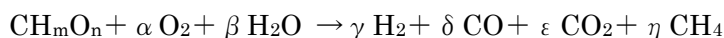
Fig. 6 生成ガスの濃度変化

Fig. 6 は、生成ガスの濃度変化である。実験開始直後から 30~70%の一酸化炭素や、10~30%のメタンを含み、発熱量も 10MJ/m³を上回る生成ガスが得られた。これまで世界各地で実施された UCG 現場試験のうち、純酸素を酸化剤として用いる UCG 試験で発生するガスの発熱量は、8~14MJ/m³であり、今回の実験では妥当な発熱量のガスを生産することができた^{4) 5)}。

実験開始後 16 時間から 22 時間経過した時点で、酸素濃度の増加 (最大 10%) が認められた。この期間の CO や CH4 濃度は低下傾向にあり、発熱量も 10MJ/m³を下回った。これは燃焼領域全体の発熱量が低下し、ガス化領域も縮小したためと推測される。22 時間経過以降は、再び酸素濃度が低下して CO や CH4 濃度が上昇し、生成ガスの発熱量も再び増加に転じている。Fig. 5 の急激な温度変化の時期に対応しており、燃焼領域が再び拡大してガス化が進展したと考えられる。

4. 回収エネルギー

上述した室内実験および現場試験の結果をもとに、ガス化に消費された石炭の量や発生ガスの量、発生した熱量の推定を試みた。海保ら (2011) は、石炭ガス化反応式を以下のように表し、C, H, O の収支から、反応石炭量や発生ガス量、発生熱量の推定方法を提案している⁶⁾。



生成ガスの H₂, CO, CO₂, CH₄ ガス濃度と、石炭の灰分も含めた炭素割合、C に対する H および O の割合から求めた。生成ガスの各濃度は実測平均値を用い、石炭内の炭素割合等は、各石炭の工業

分析値，元素分析値を用いた⁷⁾。ただし，エチレンやエタンの発生は微量のため，無視した。結果を，Tab.1 と Tab.2 に示す。Tab.1 の発熱量は，生成ガスから得られた平均値である。

現場実験では，実験時間が長く，リンキング孔も大きく供給酸素量も多いため，反応石炭量が大きく異なっている。室内実験では，実験後にモデルの重量が 5.78kg 減少していた。反応石炭量は 2.97kg であり，この差はモデル内の水分であろうと推察される。一方，石炭 1kg 当たりの発生ガス量や発生熱量を見ると，両者に大きな違いは見られない。

Tab.1 反応石炭量の比較

| | 実験時間 | 酸素流量 | 反応石炭量 | | 発熱量 |
|------|------|-------------------|-------|-------|-------------------|
| | h | m ³ /h | kg/h | 総量 kg | MJ/m ³ |
| 室内実験 | 7.67 | 0.30 | 0.39 | 2.97 | 11.3 |
| 現場試験 | 39 | 1.20 | 1.49 | 58.24 | 11.6 |

Tab.2 発生ガス量，発生熱量の比較

| | 発生ガス量 | | | 発生熱量 | | |
|------|--------------------|----------------|--------------------|-------|--------|-------|
| | /時間 | 総量 | /石炭 | /時間 | 総量 | /石炭 |
| | m ³ /hr | m ³ | m ³ /kg | MJ/h | MJ | MJ/kg |
| 室内実験 | 0.47 | 3.61 | 1.22 | 5.33 | 40.85 | 13.74 |
| 現場試験 | 1.98 | 77.36 | 1.33 | 23.01 | 897.32 | 15.41 |

5. おわりに

垂直孔の孔底で石炭に着火し，水平あるいは炭層に平行なリンキング孔を通してガスを回収する室内実験と現場試験の結果を示した。いずれも酸素を注入し，妥当で実用可能なガスおよび熱量を回収することができた。しかしながら，注入酸素流量を一定にしても徐々に各種ガス濃度は変化し，安定した制御ができないことがわかった。今後は，更に注入ガスによる地下ガス化の制御を試みると共に，燃焼およびガス化領域の積極的な拡大方法を探る予定である。

今回の現場試験に多大なるご協力戴いた三笠市役所，(株)砂子組砂子炭鉱の皆様方に，厚くお礼申し上げます。また，本研究は三笠市，文部科学省科学研究費補助金（基盤 B 一般：21360441），ノーステック財団「研究開発助成事業」，室蘭工業大学環境科学防災研究センターならびに石炭地下ガス化研究会のご支援により実現できました。関係各位にお礼申し上げます。

文献

1. 石炭地下ガス化研究会（JCOAL内）：石炭地下ガス化ポテンシャル調査報告書（NPO法人地下資源イノベーションネットワーク）（2008）
2. 板倉ほか：石炭の地下ガス化に関する動向と問題点について，資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料，B5-8，229-232（2007）
3. 板倉，大賀，出口：石炭地下ガス化に関する基礎実験；第11回北海道エネルギー資源環境研究発表会予稿集，p47-50（2011）
4. IEA CCC: Underground Coal Gasification, CCC/151(2009)
5. Burton E., et al: Best Practice in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory(2007)
6. 海保ほか：生成ガス組成からガス化の化学過程を推定する方法，第20回日本エネルギー学会大会講演要旨集，p18（2011）
7. 北海道通産局：北海道の石炭（1993）