

8 石炭地下ガス化に関する基礎実験

室蘭工業大学 ^{いたくらけんいち} ○板倉賢一, 北海道大学 ^{おおがこうたろう} 大賀光太郎

NPO 法人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) とは、地下の炭層に坑井を掘削して原位置で石炭をガス化し、一酸化炭素、水素、メタン等の生成ガスを回収する技術である[1]。UCG 生成ガスは、直接燃焼させて発電等に利用できる他、液体燃料や化学製品の原料としても利用可能である。UCG は、公害抑制、特に硫黄や窒素酸化物、水銀の排出に関しては効果的であり、また燃焼後の石炭灰を処理する必要もない。近年では二酸化炭素の分離回収技術と組み合わせ、地下のガス化空洞に二酸化炭素を貯留する技術も検討されている。UCG を用いることで、従来の採掘方法では技術的あるいは経済的に採掘することができない石炭層から効率的にエネルギーを回収することが可能となり、利用可能な石炭資源が大幅に増加する。

イギリスでの最初の UCG 試験 (1920 年代) に始まり、その後本格的な研究開発が旧ソビエト連邦で進められてきた[2]。その中には、50 年後の現在も未だに稼働しているアングレン (ウズベキスタン) の UCG ガス発電プラントがある。アメリカでも 1975 年から 1996 年の間に 30 以上ものパイロット試験が実施されている。安価な天然ガスや地下水汚染の懸念から、UCG 開発の勢いは一時期衰えたが、リンキングを容易にする試すい技術の発達、あるいは非採掘炭層の開発や代替天然ガスの必要性から、UCG は近年多くの国で再び脚光を浴びている。1991 年以来、中国では少なくとも 16 の試験が実施され、化学原料及び肥料原料向けの UCG プロジェクトが進められている。現在、豪州 (3 箇所)、南アフリカ、カナダ、中国で、発電、液体燃料や代替天然ガス製造、肥料製造のための複数の商業化を見据えたパイロットプロジェクトが既に稼働しており、更にアメリカ、ロシア、イギリス等の国で具体的な UCG 実施計画が立てられている[3]。

本基礎実験は石炭地下ガス化研究会 (会長 宝田恭之 群馬大学教授) の活動の一環として実施しているもので、石炭層をモデル化した供試体を用いて燃焼実験を行い、供試体への空気 (または純酸素) の供給量と石炭燃焼、温度変化、生成ガスの組成変化等、石炭燃焼とガス化に係る様々なデータを収集している。また、温度計測、AE 計測、実験後の破壊やき裂形状の観察により、石炭の燃焼空洞の進展過程を明らかにし、燃焼領域の広がり・移動を評価・推定する技術や数値シミュレーション開発の基礎資料とすることを目的としている。以下にはこれまでに実施してきた基礎実験の代表的な結果について報告する。

2. 石炭燃焼実験

2.1 供試体と実験システム

これまでに、表 1 に示すとおり予備実験を含めて 9 回の石炭燃焼実験を実施している。供試体としては、塊炭をドラム缶に入れて周囲を耐熱モルタルでモールドした試料 (予備 2 および D1)、塊炭を型枠に入れて周囲を耐熱モルタルでモールドし、固化後型枠を取り外して実験に供する立方体試料 (予備 1, B1~B2)、及びペール缶 (内容量 200 l) 内に塊炭を入れて周囲を耐熱モルタルで充填する円筒状試料 (B3~B6) の 3 種類を使用している。図 1 にはそれぞれの供試体の外観を示す。供試体の石炭には、三美鉱業株式会社南露天坑の美明夾炭層三番層と、釧路コールマイン株式会社 (KCM) の本層炭を用いた。これらの石炭の工業分析値 (参考値) を表 2 に示す。

表 1 石炭地下ガス化基礎実験実施概要

記号	石炭試料	カバー	リング孔	燃焼時間 hr	酸化剤	熱電対	AE	最大発熱量 MJ/m ³
予備 P1	三美鉱業 塊炭	耐熱セメント ブロック	水平 下部	1.0	空気	試料 4	8	-
予備 P2	三美鉱業 紛炭	耐熱セメント ドラム缶 (0.2m ³)	水平 下部	31.5	空気	試料 15 排気 1	1	3.1 (平均 2.0)
D1	KCM 塊炭	耐熱セメント ドラム缶 (0.1m ³)	傾斜 下⇒上部	21.8	空気	試料 12 排気 1	8	4.1 (平均 1.2)
B1	KCM 塊炭	耐熱セメント ブロック	V字 1入気・1排気	5.0	空気	試料 5 排気 1	6	2.0 (平均 0.5)
B2	KCM 塊炭	耐熱セメント ブロック	V字 1入気・1排気	6.3	空気	試料 4 排気 1	6	1.6 (平均 0.6)
B3	KCM 塊炭	耐熱セメント ペール缶 (20ℓ)	V字 1入気・1排気	3.7	空気+ 純酸素	資料 7 排気 1	6	1.2 (平均 0.3)
B4	KCM 塊炭	耐熱セメント ペール缶 (20ℓ)	V字 1入気・2排気	8.0	純酸素	試料 7 排気 2	6	13.2 (平均 9.4)
B5	KCM 塊炭	耐熱セメント ペール缶 (20ℓ)	平行 2本 1入気・1排気	7.8	純酸素	試料 7 排気 2	6	14.6 (平均 6.3)
B6	KCM 塊炭	耐熱セメント ペール缶 (20ℓ)	同軸型 1入気・1排気	7.8	純酸素	試料 7 排気 2	6	10.6 (平均 7.2)

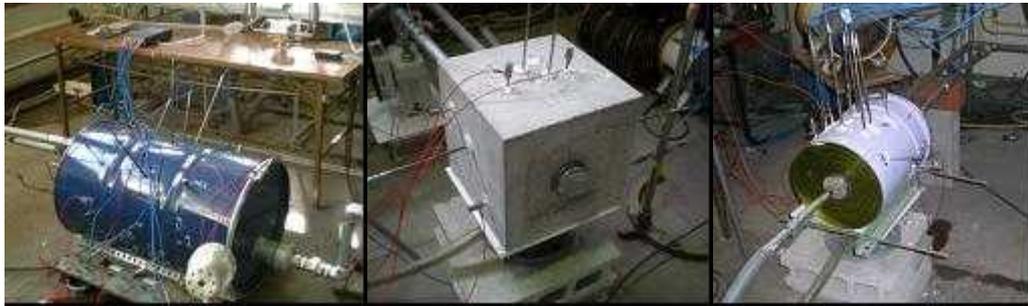


図 1 燃焼試験に使用した各種供試体 (左 : ドラム缶、中央 : ブロック、右 : ペール缶)

表 2 使用した石炭の工業分析値 (参考値)

炭鉱名	炭層名	水分 %	灰分 %	揮発分 %	固定炭素 %	発熱量 kcal/kg	燃料比
三美鉱業・南露天坑	3番層*	2.86	9.04	42.04	46.06	7,022	1.10
釧路コールマイン	本層**	6.1	14.5	42.9	36.5	6,250	0.85

(*北海道通産局(1993); 北海道の石炭、**炭鉱調べ)

図 2 は典型的な実験システムの概念図である。燃焼実験に際しては、供試体の側面でガスバーナにより石炭に着火し、着火確認後配管を接続して毎分 50ℓ 程度の空気 (あるいは 10ℓ 程度の純酸素) を送って石炭を燃焼させた。供試体には熱電対を埋設して供試体内部 (石炭部分) の温度並びに生成ガスの温度を計測した。供試体の下にはロードセルを配置し、燃焼・ガス化に伴う重量変化も計測した。さらに実験中にサーモグラフィで供試体を撮影し、外壁の温度分布の変化を調べた。また、通常 6 個の AE センサを燃焼域を取り巻くように配置し、燃焼中の AE イベント数、AE カウント数を記録すると同時に、後日 AE 発生箇所とその規模を特定するために、全チャンネルの波形も記録した。さらに、PC で制御するマイクロログスクリプトにより生成ガス

を 10 分間隔で自動サンプリングし、酸素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、メタン、エチレン、エタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタンなどを分析対象ガスとしてそれらの容積割合を求めた。

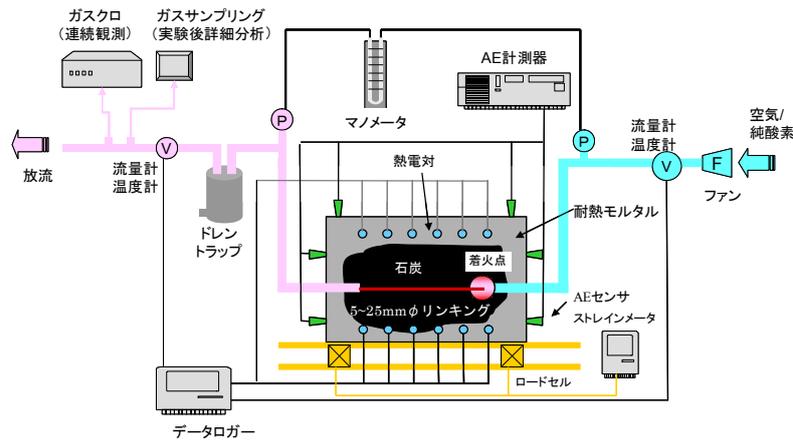


図 2 典型的な燃焼試験の概念図

2.2 実験結果の例

当初の実験では空気を酸化剤とする燃焼実験を実施したが、空気燃焼では安定した燃焼・ガス化を長時間継続させるための空気流量の調節が難しく、供試体 B4 以降は純酸素による燃焼実験を行っている。図 3 にこれまでの基礎実験で得られた生成ガスの最大発熱量を示す。空気燃焼の場合は窒素ガスが生成ガスに含まれるために最大発熱量が 1~4 MJ/Nm³程度と低いが、純酸素燃焼の場合は 10~15 MJ/Nm³程度と高くなるのが特徴的である。

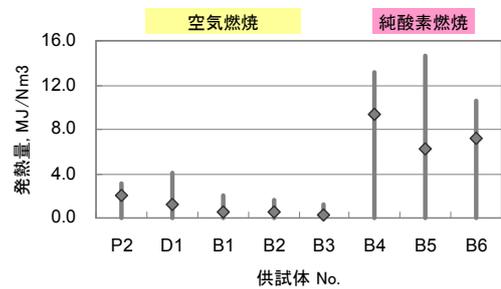


図 3 生成ガスの発熱量 (最大値と平均値)

以下には酸素燃焼を行った供試体 B4 の実験結果を一例として示す。この実験ではパール缶に塊炭を詰めた供試体を用い、石炭に着火後、毎分 5ℓ から 10ℓ の純酸素を注入した。図 4 の供試体の水平断面図に示すように、2本のリンキング孔を供試体のほぼ中央断面に沿ってV字型に配置し、送風孔から酸素を注入し、二つに分かれた排出孔から生成ガスを回収した。図 4 には熱電対の配置も示されている。これらの熱電対は、ほぼリンキング孔が存在する断面内に位置するよう埋め込まれている。図 5 は実験中の熱電対の温度と AE イベント (累積値) の経時変化を示している (CH8 と CH9 はガス排出管路内の温度)。同図より、最初は着火点に最も近い CH1 の温度が上昇しているが、その後、入気孔側から見て左側のリンキング孔を中心に温度が上昇していったことが分かる。6 時間が経過した以降に、右側のリンキング孔周辺でも温度上昇が認められて

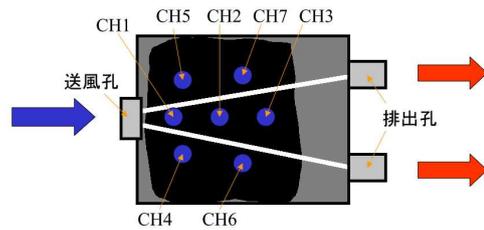


図 4 リンキング孔の形状と熱電対の配置

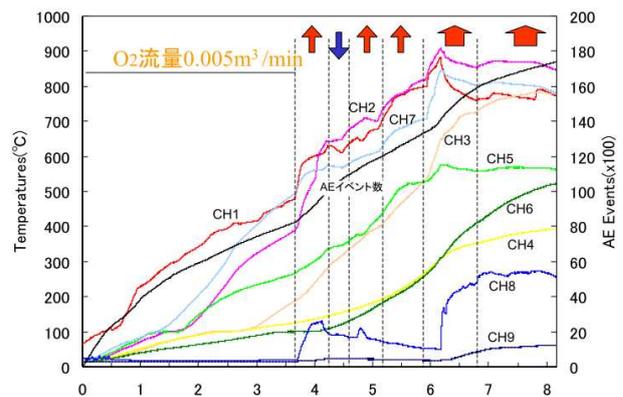


図 5 温度及び AE 活動の経時変化

いる。CH8の熱電対は右側の排気孔の配管に設置されていたが、6時間経過後に温度が急上昇している。また、AEイベント数も同じ頃に急上昇している。これらのことから、それまで左側のリンキング孔を中心として燃焼・ガス化が進展していたものが、燃焼に伴う亀裂の進展によりガスの流動経路が変化したことが推察できる。同様の温度上昇の様子は、図6の熱電対が埋設された水平断面内の等温線図からも明らかである。図5のCH1～CH3の温度変化が比較的安定している200～300℃の範囲で、同じ温度に達するまでの時間と熱電対間の距離から燃焼領域の移動速度を推定した結果、おおよそ0.03m/hという値を得た。

図7は生成ガスの経時変化である。実験開始当初は供試体や配管内部に残っている窒素が検出されているが、その後はほぼゼロに低下している。CH1の熱電対温度が急上昇する時点から二酸化炭素、一酸化炭素、メタン、水素などが急増し、その後増減はあるものの、ほぼ実験終了時点までそれらのガスが相当量発生していたことがわかる。空気吹きの結果と比較すると、明らかに一酸化炭素、水素、メタンなど可燃性ガスの発生量が多く、その発生状況もかなり安定している。実験開始後30分と終了前1時間を除いた約7時間の生成ガスの平均発熱量はほぼ10 MJ/Nm³と比較的高い値を保っていた。

3. おわりに

これまで予備実験を含め大きさ、形状、リンキング孔配置が異なる9個の供試体を用いて、空気や酸素を注入する石炭燃焼・ガス化実験を実施してきた。これまでのところ、酸素を注入する方法が最も安定した燃焼・ガス化を可能にすることや、着火後の空気や酸素の注入量の制御が燃焼領域やガス化の進展に大きく影響することなどが明らかとなっている。温度分布から燃焼領域の進展速度についての推定を試みているが、今後、1回の実験で数千件のレベルで発生しているAEの発生場所とその規模に関する解析が進めば、燃焼領域の拡大に関する知見がさらに得られると考えられる。最後に、石炭試料を提供していただいた三美鉱業株式会社ならびに釧路コールマイン株式会社に謝意を表す。

[1] 持田(2008):クリーン・コール・テクノロジー, 工業調査会

[2] Burton E., et al (2007): Best Practice in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory

[3] IEA CCC (2009): Underground Coal Gasification, CCC/151

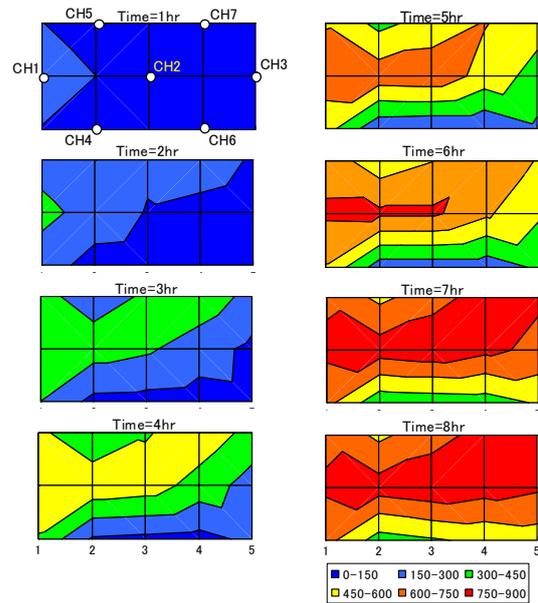


図6 熱電対埋設断面の等温線図

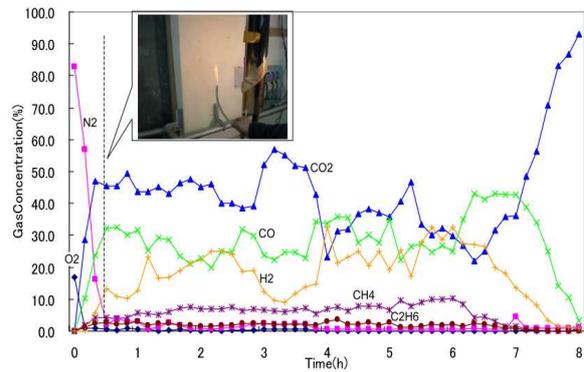


図7 生成ガス成分の経時変化