

石炭地下ガス化のための燃焼実験

室工大 板倉 賢一 北大 大賀 光太郎
NPO 地下資源イノベーションネットワーク 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で石炭をガス化させ、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]。この生成ガスは、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の処理の必要もない。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をガス化することで、利用可能な石炭資源が大幅に増加する。

UCG は多くの国で試験されて来ている[2]。最も早く UCG の現場実験を実施したのはイギリス(1920年代)であるが、本格的な研究開発は旧ソビエト連邦で進められ、現場試験や幾つかの商業プロジェクトを50年以上実施して来た。その中には、50年後の現在もまだ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。アメリカは、1975年から1996年の間に30以上ものパイロット試験を瀝青炭、亜瀝青炭、及び褐炭について実施している。1991年以来、中国で少なくとも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。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、方向制御を可能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。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]。

我が国における UCG への取組は活発ではないが、2008年6月に「石炭地下ガス化研究会(会長 宝田恭之 群馬大学教授)」が発足した。研究会の構成は学識経験者としての個人会員9名、企業会員14社であり、主に情報収集・文献調査を中心とした活動を展開している。また、UCG シミュレーションソフトの開発や基礎試験にも取り組んでいる。

本研究は石炭地下ガス化研究会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(または酸素添加空気あるいは純酸素)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関係性を評価するデータを収集している。また、石炭の燃焼空洞の進展過程を、温度計測、AE 計測、実験後の破壊やき裂形状の観察により明らかにし、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ものである。

これまで7種類の供試体を用いた燃焼試験を実施してきたが、本文ではそのうち代表的な試験結果について報告する。

2. 供試体と実験システム

供試体の石炭には、三美鉱業株式会社南露天坑の美唄炭層三番層と、釧路コールマイン株式会社の本層炭を用いた。これらの石炭の工業分析値(参考値)を表1に示す。

供試体としては、塊炭を型枠に入れて周辺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と、ドラム缶あるいはペール缶内に塊炭あるいは破碎炭を入れて周囲を耐熱モルタルで充填する円筒状の試料を使用している。

表1 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)

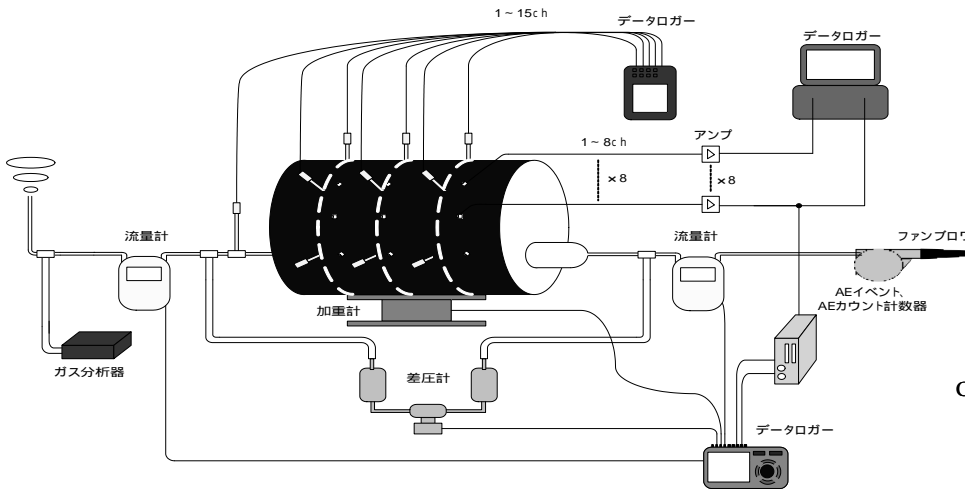


図1 ドラム缶使用供試体実験システム(空気吹き)

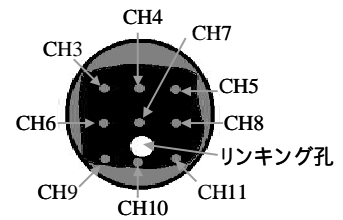


図2 熱電対の配置(中央部断面)

図1は、釧路コールマインの石炭を約35cm×35cm×50cmの角柱に整形し、容量100Lのドラム缶内に入れて隙間を耐熱モルタルで充填した供試体を用いた実験システムである。この供試体では、端面の入気孔(着火側)から反対側のガス排気孔に向けて、石炭塊を斜めに横切るように(下から上)にリング孔を設け、着火後ファンブローにより空気を送ることで石炭の燃焼を継続させた。石炭塊内部の3断面(14箇所)及び生成ガス回収配管(1箇所)に熱電対を設置しての温度計測を行った。

図2は、中央の断面における熱電対の配置を示している。また、8個の耐熱加速度計を石炭塊にまで達するウェーブガイドを介して取り付け、1チャンネルのAEカウント数およびイベント数、全チャンネルのAE波形を記録した。これら以外に、入気孔と生産孔の差圧と流量、供試体の重量変化およびガスクロマトグラフィによる生成ガスの成分分析を行った。また、供試体表面の温度分布の変化をサーモグラフィで定期的に記録した。

図3は、ドラム缶よりも小さいペール缶に釧路コールマインの石炭ブロックを詰めた供試体の実験システムを示している。ペール缶と石炭ブロックの隙間は耐熱モルタルで充填されている。但しこの場合は、リング孔は石炭の成層面に平行に2本設けている。この実験では、酸素ボンベから減圧して直接純酸素を送ることで燃焼を継続させた。AE計測は6チャンネルで行い、石炭塊内の7箇所と生成ガスの温度(2箇所)を計測した。それ以外の計測項目は図1と同じである。図4は、この供試体の外観である。熱電対やAE検出用ウェーブガイドは石膏で充填して固定した。

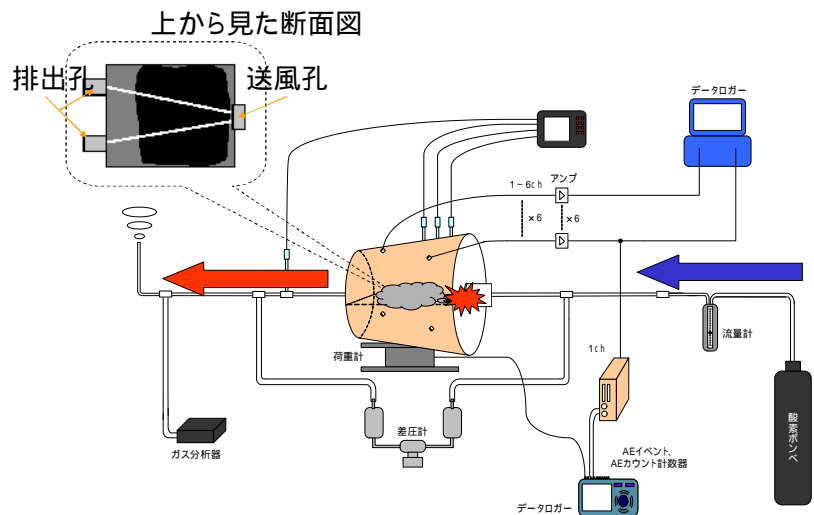


図3 ペール缶使用供試体実験システム(酸素吹き)



図4 ペール缶使用供試体の外観

3. 実験結果の例

3.1 空気吹きによるガス化実験

図1の供試体を用いた実験では、空気の注入量を約100L/minから250L/minの間で変化させた。図5は、空気の注入量と生成ガス流量の経時変化であり、同図には全熱電対の平均温度も示している。図6は、各熱電対の温度、AE イベント数、供試体荷重の経時変化を表している。図5の横軸1:20頃から空気注入量が徐々に増加している。これは、石炭の燃焼および破壊の進行に伴い流路が拡大したためと推察されるが、これにより、さらに石炭の燃焼・ガス化が進展し、CH11の近傍の温度およびAE イベント数が急増している。また、燃焼・ガス化により供試体重量も急激に減少している。この後、生成ガスの流量計測に使用していた流量計（プロパンガスマーター）内部にタール分が附着して作動不能となり、管路の閉塞をもたらした。その結果、3:30から7:30頃にかけては燃焼が停滞しているが、流量計を取り外して生成ガス側の管路を開放したことで空気注入量は回復している。図5及び図6からは、空気の注入量が増えると全体温度は上昇し、AE 活動も活発になることが示されているが、これは燃焼領域の拡大に伴う現象であると考えられる。また、温度分布の変化から、燃焼領域がリンク孔に沿って上部に移動していることも推察できる。

図7は、主なガス成分の経時変化である。0:30頃に酸素濃度の急激な低下が見られ、その後二酸化炭素、メタン、水素の濃度増加が認められる。この状態は供給した空気中の酸素を消費するのに十分な燃焼領域が発達し、その結果、その発生熱により周辺の石炭のガス化が進展したことに起因すると考えられる。ただし、この実験では一酸化炭素の生成量は極端に少ない量であった。生成ガスの発熱量は最大でも02:00前後の3~4MJ/Nm³であったが、一般に空気を使用した石炭地下ガス化で得られる生成ガスの発熱量は3~6MJN/m³程度であると言われている[4]。

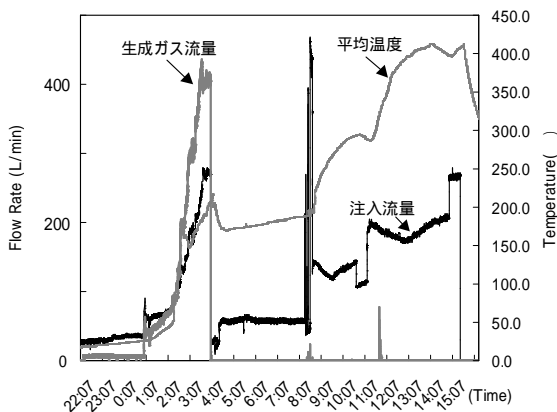


図5 注入・生成ガス流量と平均温度の経時変化

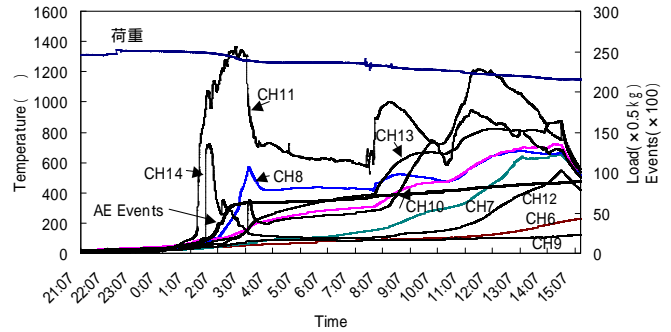


図6 温度、荷重、AE 活動の経時変化

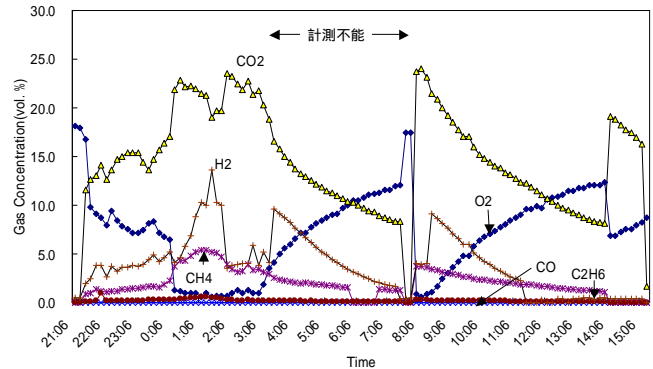


図7 生成ガス成分の経時変化

3.2 酸素吹きによるガス化実験

図3のペール缶供試体を用いた実験では、石炭に着火後、毎分5Lから10Lの純酸素を注入した。図8の供試体の水平断面図に示すように、この実験ではV字型に2本のリンク孔を供試体のほぼ中央断面に沿って配置し、入気孔から酸素を注入し、二つに分かれた排気孔から生成ガスを回収した。図8には熱電対の配置も示している。これらの熱電対は、ほぼリンク孔が存在する断面内に位置するように埋め込まれている。熱電対のCH8とCH9はガス排出管路内の温度を計測するためのものである。

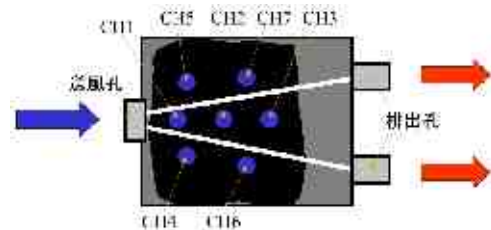


図8 リンキング孔の形状と熱電対の配置

図9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。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ク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、右側のリンク孔周辺でも温度上昇が認められている。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ク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10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9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。

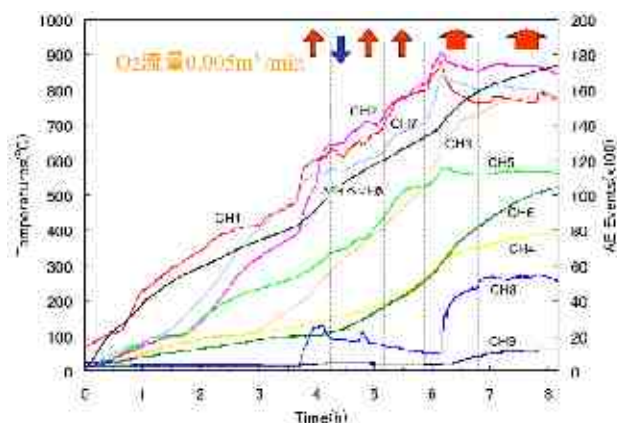


図9 温度及びAE活動の経時変化

図11はパール缶供試体の生成ガスの経時変化である。試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。図7の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10MJ/Nm³と高い値を保っていた。

4. おわりに

これまで予備実験を含め大きさ、形状、リンク孔配置が異なる7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であろう。

本実験は当初の目的を達成するために、平成22年度も継続する計画である。

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。

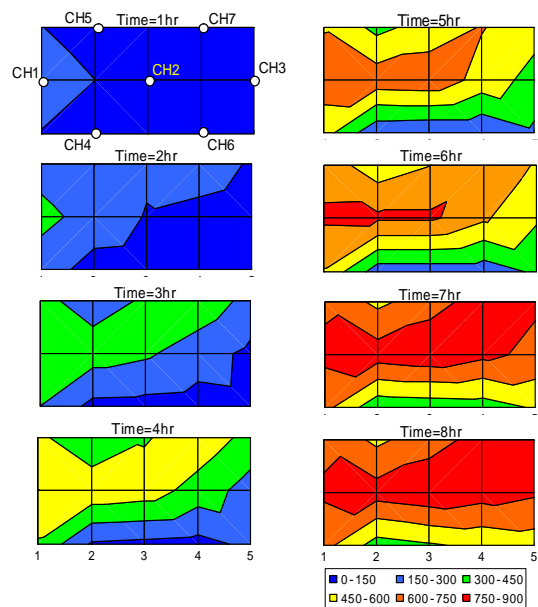


図10 熱電対埋設断面の等温線図

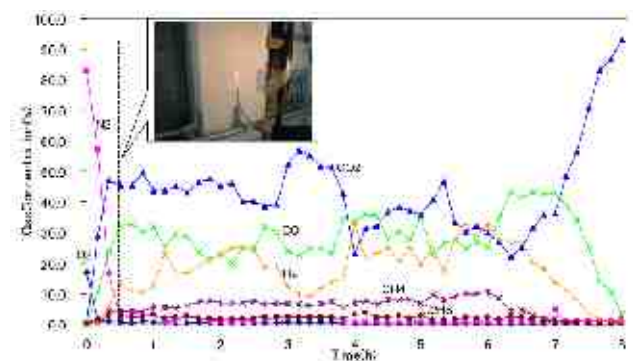


図11 生成ガス成分の経時変化

参考文献

- [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
- [4] 藤岡他(2009): 石炭地下ガス化の現状, 資源・素材2009(札幌)講演資料 A13-11