

1 石炭の地下ガス化 (UCG) のための燃焼実験

室蘭工業大学 いたくらけんいち 板倉賢一, わかまつまさひろ 若松真広, ごとうたつひこ 後藤龍彦, よしだゆたか 吉田 豊

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 でくちごうた 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],[2]。この生成ガスは直接燃焼させて発電等に利用できるほか、液体燃料や化学製品の原料にも利用可能である。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をガス化することで、利用可能な石炭資源を大幅に増やすことができる。

UCG は多くの国で試験されてきている[3]。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実施し、瀝青炭、亜瀝青炭、及び褐炭について試験している。それ以前には、旧ソビエト連邦が UCG に関する研究、現場試験、並びに幾つかの商業プロジェクトを 50 年以上実施してきた。その中には、50 年後の現在もまだ稼働しているウズベキスタンのアングレンの発電プラントがある。1991 年以来、中国は少なくとも 16 の試験を実施し、化学原料及び肥料原料向けの商業 UCG プロジェクトを有している。2000 年には、オーストラリアが合成ガスを生産する大規模なパイロット試験 (Chinchilla) を開始した。現在、アメリカ、カナダ、南アフリカ、インド、オーストラリア、ニュージーランド、及び中国において、発電、液体燃料製造、合成天然ガス製造のための複数の商業プロジェクトが稼働している。

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、学識経験者の個人会員 9 名、企業会員 14 社で情報収集・文献調査を中心とした活動を展開している。また、UCG の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石炭燃焼実験を行い、石炭試料ブロックへの空気(または酸素添加空気)の供給量と石炭燃焼、石炭温度変化、生成ガスの組成の変化等、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する。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の基礎資料とするものである。

今回は、実験方法の適合性を評価するために実施した予備実験の結果を報告するもので、今後本実験の結果を踏まえて本格的な石炭の燃焼実験を進める予定である。

2 . 石炭燃焼実験

2 . 1 実験装置と方法

供試体は直径約 60cm、高さ約 89cm のドラム缶内側に厚さ約 10cm の耐熱モルタルの層を作り、その中に三美炭鉱(美唄)で採取した美唄夾炭層 (三番層) の粉炭を詰めて作製した。美唄層三番層の工業分析値 (参考値) を表 1 に示す。

図1は実験システム概念図であり、図2は熱電対を埋設した供試体の概観である。燃焼実験に際しては、供試体の側面から着火させ、着火確認後配管を接続してハンドブローで毎分50リットル前後の空気を送って石炭を燃焼させた。供試体の入気側と排気側の圧力差は、約4.5kPaであった。

供試体には1chから12chの熱電対を埋設して供試体内部（石炭部分）の温度を測定し、更に13chの熱電対で生成ガスの温度を測定した。図3、図4は熱電対の配置図である。これらの温度を、データレコーダにサンプリングタイム1分で記録した。さらに実験中にサーモグラフィーで供試体を撮影し、外壁の温度分布の変化を調べた。また、1個のAEセンサを装着し、燃焼中のAEイベント数、AEカウント数を記録した。

更に、PCで制御するマイクロガススクロを用いて生成ガスを10分間隔で自動サンプリングし、ガス成分の分析も行なった。

表1 使用した石炭の工業分析参考値

夾炭層	炭層名	水分 %	灰分 %	揮発分 %	固定炭素 %	発熱量 kcal/kg	燃料比
美唄層	3番層	2.86	9.04	42.04	46.06	7,022	1.10

(北海道の石炭、北海道通産局1993より)

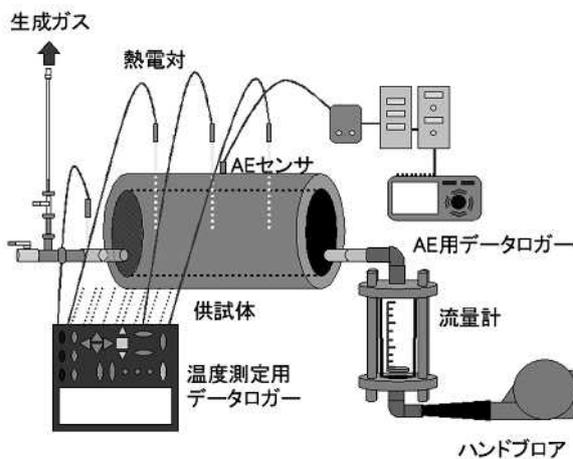


図1 燃焼実験実施概念図

図2 供試体の写真

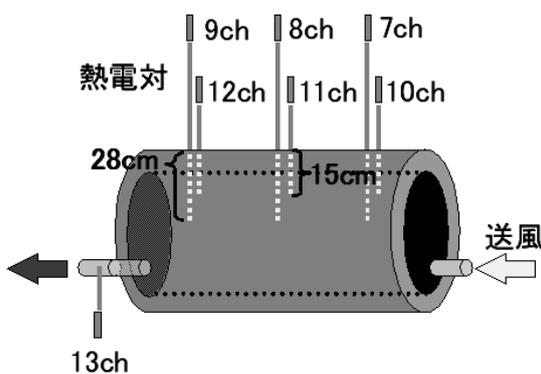


図3 横から見た熱電対の配置

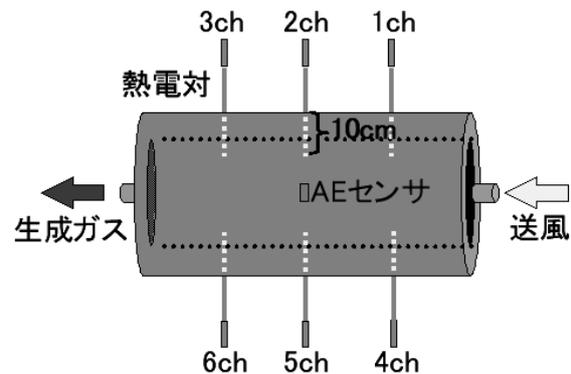


図4 真上から見た熱電対の配置

2.2 温度変化と温度分布変化

図5は、実験期間中の各熱電対の温度変化で、横軸が温度測定開始からの時間(分)、縦軸が炭層内の温度を示している。同図より、最初は着火場所に最も近い石炭内部の7chの温度が上昇し、次に4chの温度、そして10chの温度が上昇している。また4chの温度上昇に伴い8chの温度も上昇していることがわかる。さらに8chの温度上昇に伴い、今度は5chと11chの温度が上昇している。すなわち、燃焼領域が下部から上部へ移動していると同時に、左右へも移動していることがわかる。但し、図5の左側の図の熱電対は着火した口元に近い同じ断面内に配置された熱電対であることを考えると、燃焼の伝播が非常に緩やかで、また僅か13cmしか離れていない7chと10chの温度差が最大900を超えなど、石炭の熱伝導度が非常に低いことも同図より明らかである。

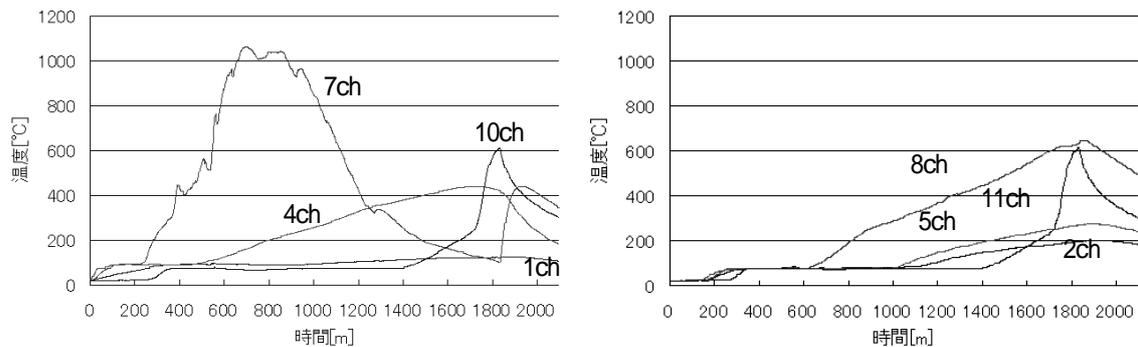


図5 熱電対の温度変化

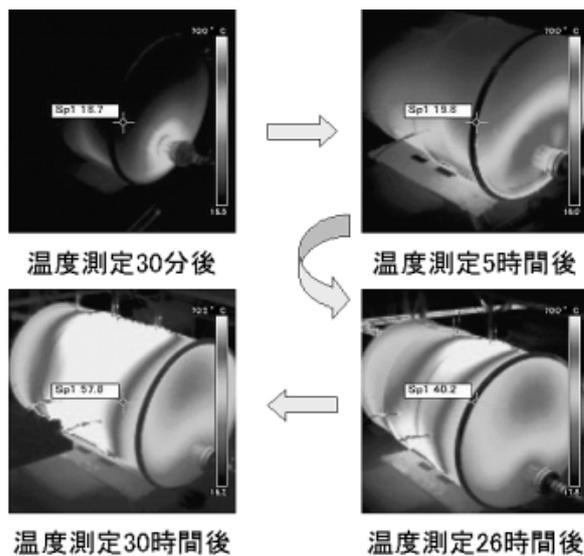


図6 外壁温度分布の変化状況

図6は温度分布を調べるために、サーモグラフィで撮影した写真である。同図より、時間経過と共に燃焼領域が広がっていく様子が確認できる。またこの温度分布の変化は、熱電対で測定した温度変化と対応しており、燃焼領域の移動を明確に捉えることができた。

2.3 生成ガスのガス成分

分析対象としたガスは、酸素、窒素、一酸化炭素、二酸化炭素、水素、メタン、エタン、プロパン、i-ブタン、n-ブタンであったが、プロパン、i-ブタン、n-ブタンに関しては実験期間中顕著な発生は認められなかった。

図7にガス分析の結果を示す。燃焼の進展に伴い、酸素濃度が急激に低下し、二酸化炭素濃度が上昇している。また、一酸化炭素濃度も徐々に増加し、実験開始から約8時間を経過した頃に12%を越えるピーク値を示した。この時点での生成ガスのガス成分から計算した発熱量はおおよそ 2.7MJ/m^3 (約 550kcal/m^3)であった。空気を使用した石炭の地下ガス化で得られる一般的な生成ガスの発熱量は $3\sim 6\text{MJ/m}^3$ 程度 [4]である。13時間以降の時間帯では、一酸化炭素濃度の減少と酸素濃度の顕著な上昇が認められ、ガス化の結果得られると予想されるガス成分は確認できなかった。燃

図7にガス分析の結果を示す。燃焼の進展に伴い、酸素濃度が急激に低下し、二酸化炭素濃度が上昇している。また、一酸化炭素濃度も徐々に増加し、実験開始から約8時間を経過した頃に12%を越えるピーク値を示した。この時点での生成ガスのガス成分から計算した発熱量はおおよそ 2.7MJ/m^3 (約 550kcal/m^3)であった。空気を使用した石炭の地下ガス化で得られる一般的な生成ガスの発熱量は $3\sim 6\text{MJ/m}^3$ 程度 [4]である。13時間以降の時間帯では、一酸化炭素濃度の減少と酸素濃度の顕著な上昇が認められ、ガス化の結果得られると予想されるガス成分は確認できなかった。燃

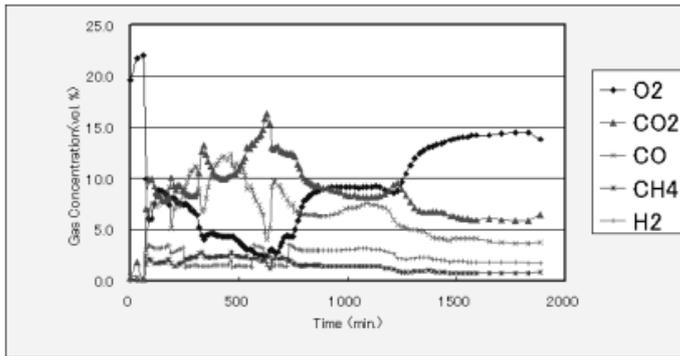


図7 生成ガスのガス成分の変化

焼区域は引き続き徐々に移動していることは温度計測より確認されているので、実験の後半では燃焼領域やガス化領域が小さくなったにもかかわらず、注入する空気量を一定としたことで、過剰な空気注入により生成ガスが希釈されたことがこの原因ではないかと考えられる。燃焼やガス化の状況（ガス成分で判断）に応じて、注入する空気量を調整することが重要であると考えられる。

2.4 温度変化とAE活動

図8は、今回の実験で測定されたAE活動である。AE活動を、累積イベント数と1秒間あたりのAEカウント数で表している。同図と図5より、石炭内の7chの温度上昇と共に、多数のAEが発生していることがわかる。多くのAEが、石炭の燃焼に伴うき裂の発生、進展によるものと仮定すると、温度が熱応力に対応し、その熱応力によってき裂が発生、進展したと考えることができる。ただし、今回の実験は粉炭の燃焼であるためAEは石炭からではなく周辺のもルタルから発生したとことも考えられ、今後明らかにしていく必要がある[5]。

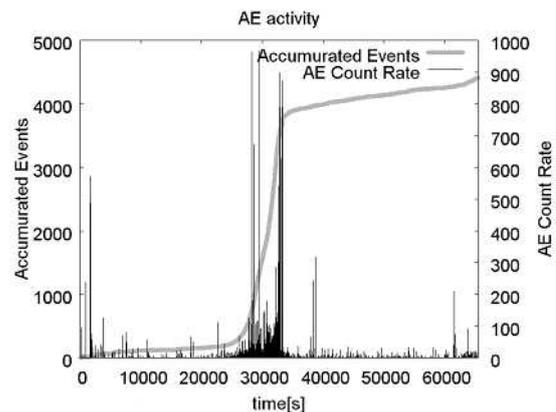


図8 AE活動

3. おわりに

今回の予備実験により、実験の手順や、温度、ガス成分およびAE等の計測システムの有効性も確認できた。今後予定している実験では、石炭試料を粉炭からブロック炭に変えて地下での石炭ガス化により近い条件を再現すると同時に、入気と排気の両方の流量、実験中の供試体重量変化等も計測し、ガス化に伴う材料バランスについても検討する予定である。また、空気に酸素を付加して高酸素濃度の注入ガスによるガス化実験も試みる予定である。更には、複数のAEセンサを用いることで燃焼領域の進展をモニタリングする可能性についても検討していく。

参考文献

- [1] 黒岩(1962):石炭の地下ガス化、炭鉱双書7、技術書院
- [2] 持田(2008):クリーン・コール・テクノロジー、工業調査会
- [3] Burton E., et al (2007): Best Practice in Underground Coal Gasification, Lawrence Livermore National Laboratory
- [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
- [5] 板倉他(2009):石炭の燃焼に伴うAE活動、資源・素材関係学協会合同春季大会分科研究会資料