

# 同軸型石炭地下ガス化 (UCG) プロセスの開発

板倉 賢一 [室蘭工業大学／教授]  
 後藤 龍彦 [室蘭工業大学／教授]  
 大賀 光太郎 [北海道大学／助教]  
 出口 剛太 [NPO法人地下資源イノベーションネットワーク／常務理事]  
 五十嵐 博 [株式会社砂子組／石炭部顧問]  
 吉原 信治 [株式会社砂子組／三笠露天坑炭鉱長]

## 背景・目的

近年、ボーリング技術の向上と環境保全の観点から、石炭の地下ガス化(UCG:Underground Coal Gasification)が注目され、世界各国で実用あるいは試験が行われている。本研究開発では、北海道の未利用石炭の活用に適した、オリジナルな同軸型 UCG プロセスの開発を目指す。同軸型 UCG は、地表から炭層に向けた1本の孔井から空気や酸素を炭層内の燃焼・ガス化領域に送り、同じ孔井でガスを回収する技術である。これまでの室内実験により、実現の可能性を見出した。今回の研究開発の目的は、露天掘炭鉱で原位置模擬試験を行い、本プロセスの実現可能性を評価することにある。

## 内容・方法

三笠市の砂子組三笠露天坑において、炭層露頭部から傾斜(約25度)に沿って直径42mm、長さ約4mの同軸孔を穿孔した。その孔井内に、新たに設計したセラミックス製可動内管(1m)を有する同軸管を設置し、孔底の燃焼領域に酸素を一定流量(15 l/min)で供給した。同軸孔周辺の温度変化と生成ガスの温度を計測するために、8本の熱電対を配置した。また、燃焼・ガス化領域での破壊活動を監視するために、破壊音(AE:Acoustic Emission)センサも配置した。更に、燃焼空洞の評価のために、試験の前後で表面波探査を実施した。試験中には、酸素注入量、同軸孔周辺温度、AE イベント数/カウント数の計測、AE 波形の記録に加え、定期的にマイクロガスクロにより発生ガスのサンプリング(1時間に1回)を行い、生成ガスの成分と熱量等を解析した。最終的に、得られたデータの総合的な解析を行い、一般的なリンキング孔を有する UCG の場合と発熱量などを比較し、本プロセスの実現可能性を評価した。

## 結果・成果

図1と図2は、原位置模擬試験の概要と熱電対の配置を表している。また、図3は、各種センサの配置の様子である。孔底に着火後、可燃性ガスの発生を確認し、計測を開始した。

図4は、石炭への着火を確認した時点から約8時間経過後までの生成ガスに含まれる各成分の濃度変化を表

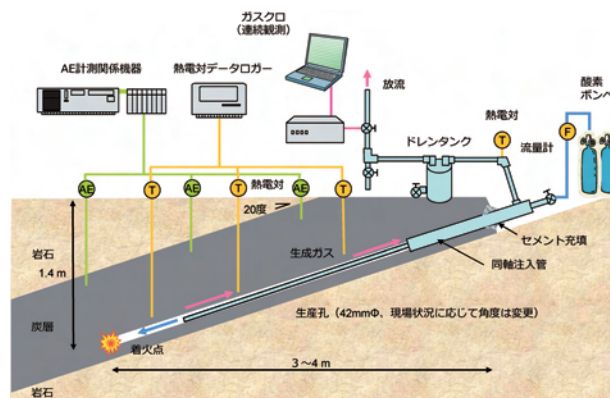


図1 同軸型 UCG 原位置模擬試験

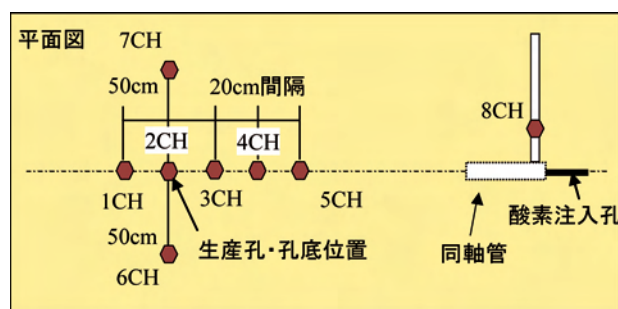


図2 熱電対の配置(平面図)

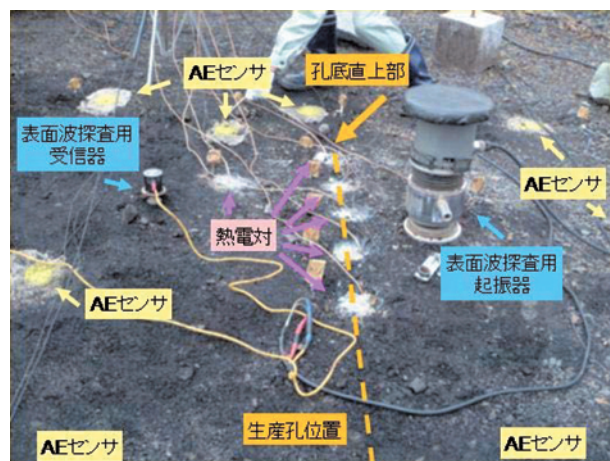


図3 原位置でのセンサ配置の様子

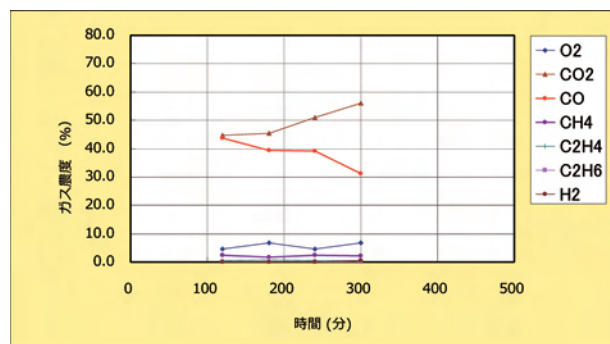


図4 主要なガス成分の濃度変化

している。計測開始から1時間経過後のガスサンプリングデータが機器の不調により分析不能であったため、2時間経過以降の分析結果を示している。また、6時間経過以降のガスサンプリングは、マイクロガスクロに接続

しているヘリウムボンベが外気温の急激な低下に起因して圧力低下を起こしたために、ガス成分の分析を実施することができなかった。但し、6時間経過以降は生成ガスに火源を近づけても燃焼しなかったため、可燃性のガス成分(COやCH<sub>4</sub>など)が減少したと推測される。このような状況が数時間継続した後、徐々に生成ガスの煙の色も薄くなり、後述するガスの温度も低下してきたため、試験は約9時間で終了した。

図4のガス濃度から計算した平均発熱量(無水、標準状態)は、約6MJ/m<sup>3</sup>であった。

図5に、実験開始から約8時間までの熱電対の温度変化を示す。同軸孔周辺の温度変化(1ch~7ch)と同軸管の生成ガス管路側で計測した生成ガスの温度変化(8ch)である。生成ガスの温度は開始10分程度で急激に上昇し、その後、80℃前後の値を示していることから、この期間中はガス化が進行していたと考えられる。その後、生成ガスの温度が徐々に低下し、燃焼が止まった。この原因は、同軸管のセラミックス管が部分的な高熱で溶断したためであることが、後に開削してわかった。一方、同軸孔周辺に埋設した熱電対には殆ど変化が認められず、少なくとも同軸孔から上部10cmの位置までは、燃焼の影響が及んでいないと推察される。このことから、今回の同軸型 UCG の燃焼・ガス化領域は局所的であったと判断される。

図6は、試験開始から約8時間後までの AE イベント数(破壊音の数)と AE カウント数の変化(破壊の相対的

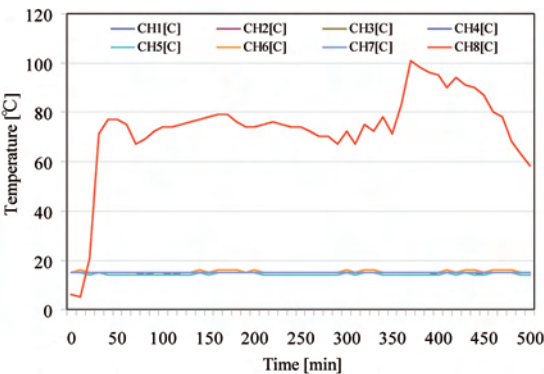


図5 熱電対による温度変化

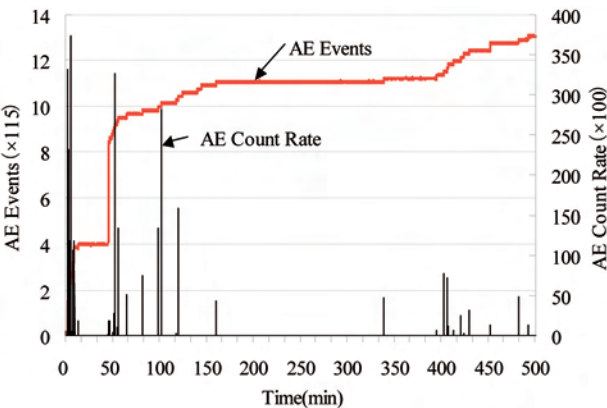


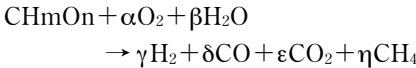
図6 AE 活動の経時変化

規模)を示している。AE イベント数は累積発生回数であり、一方 AE カウント数は1分間当たりの AE カウント数を表している。同図より、実験開始からおよそ2時間経過後までは比較的活発な AE 活動が見られたが、その後は散発的に発生し低調であることがわかる。同軸孔周辺に埋設した熱電対の温度に殆ど変化がなかったことなどと考え合わせると、燃焼領域周辺での破壊の発生が少なく、そのために燃焼領域の発達が十分ではなかったと考えられる。

また、図5と図6を比較すると、AE 活動が比較的活発な箇所、生成ガス温度も上昇傾向にあることがわかる。すなわち、燃焼・ガス化領域での破壊の進展が、次の燃焼領域の拡大に寄与していると推察される。従って、燃焼領域を拡大し、生成ガスを制御する方法として、燃焼領域周辺の炭層破壊制御が有効であると考えられる。

試験終了後に表面波探査を実験開始前と同じ測線で実施し、実験前後での生産孔周辺の変化を調査した。その結果、孔底付近に速度の減少が僅かに見られた(−50 m/s)。燃焼領域の拡大が不十分であったため、速度減少領域も小さく表れたと推察される。

次に、UCG の一般的な熱化学反応式と観測されたガス濃度の値から反応式の酸素収支を求め、反応石炭量や発生ガス量、発生熱量の推定を試みた(海保他：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))。石炭ガス化の反応式を次式で表し、生成ガス H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>の濃度(dry、N<sub>2</sub>free)を p, q, r, s とすると、酸素収支 α と水収支 β が、m, n 及び p, q, r, s によって表される。



これを用いて求めた発生ガス量と発生発熱量の結果が、表1である。表1には、本研究開発で行った結果(三笠同軸試験)と、石炭ブロックを用いて実験室で行った同軸型試験の結果を示している。実験時間や酸素注入量が異なるため、総量や時間当たりのガス量、発熱量は異なる。反応石炭量も三笠同軸試験では7.05kg、室内実験では1.06kgであった。しかし、石炭1kg当たりの発生ガス量や発熱量はほぼ等しい。この1kg当たりの発熱量は、各ガス濃度から推定された発熱量(約6MJ/m<sup>3</sup>)にも近い。戦前から稼動しているウズベキスタンのアングレン UCG ステーション(2.3–3.8 MJ/m<sup>3</sup>) や合衆国で行われた UCG 実験の結果(Rock Mountain 1: 8.8–9.5 MJ/m<sup>3</sup>) に比較しても、それほど低い値ではない事がわかった。すなわち、同軸型 UCG においても、燃焼・ガス化領域の

表1 発生ガス量と発熱量

	発生ガス量			発生熱量		
	／時間	総量	／石炭	／時間	総量	／石炭
	m <sup>3</sup> /hr	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kg	MJ/h	MJ	MJ/kg
室内同軸試験	0.28	1.44	1.36	1.62	8.36	7.91
三笠同軸試験	1.11	9.99	1.42	6.67	60.04	8.52

拡大、移動がスムーズであれば、従来のリンキング方式と同等の発熱量(約2倍)を回収できることを示唆している。

以上のように、本研究開発で同軸型 UCG プロセスにおいても実用に耐えうるガスの生成が可能であることを確認した。同軸方式 UCG は我が国独自の方式であり、燃焼・ガス化領域はリンキング孔方式と比べると小規模ではあるが、ボーリング費用が少なくすむことや、UCG の影響範囲を小さく押さえることが可能であることなどから、比較的浅部の石炭層や露天採掘の残炭等を対象にする小規模な利用形態に向いていると考えられる。この同軸型 UCG プロセスを実用化するためには、今後解決すべき課題が原位置模擬試験により明らかになった。それらは、同軸管の改良、燃焼・ガス化領域の拡大手法の開発、炭層破壊領域の評価と可視化、地下水への影響と対策などである。これらの問題は、諸外国においても十分取り組まれていないのが現状である。換言すれば、これらの問題を解決することができれば、UCG は安全で環境負荷の少ない石炭利用技術になる。

今後は、原位置実験やパイロット試験・実証試験を通して、これらの技術的課題を克服する予定である。また、炭層の破壊を考慮した石炭の地下ガス化シミュレータの開発も、同時に進める計画である。

## 今後の展望

本研究を通じて、同軸型 UCG 方式でも実用に耐えうる発熱量のガスを回収できることがわかった。しかしながら、多くの課題も見つかった。より高い発熱量を確保するための燃焼・ガス化領域拡大方法の開発、高熱で溶断しない同軸管の設計などである。また、ガス化領域周辺の破壊の可視化や地下水がある場合の影響評価が、未着手の課題として残った。次のステップでは、これらの課題解決を目指した、より規模の大きな実験を行う計画である。この段階で、オリジナル同軸型 UCG システムが完成し、その後、パイロット試験、実証試験を行う予定である。今回の研究成果から、以上の同軸型 UCG の開発ロードマップが一層明確になった。