九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

コンパクト同軸型石炭地下ガス化システムにおける燃焼・ガス化の制御に関する研究

濵中, 晃弘
九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 : 助教

蘇, 発強
河南理工大学エネルギー工学科 : 准教授

板倉, 賢一
室蘭工業大学大学院工学研究科しくみ情報系領域 : 教授

髙橋, 一弘
室蘭工業大学大学院工学研究科しくみ情報系領域 : 助教

他

https://hdl.handle.net/2324/6793755

出版情報：Journal of MMIJ. 134 (7), pp.81-90, 2018. The Mining and Materials Processing Institute of Japan
バージョン：
権利関係：© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan

KYUSHU UNIVERSITY

Vol.134, No.7, 2018

Journal of MMIJ

石炭エネルギー技術特集「石炭エネルギーの開発・利用」

BY NC ND

論文 Original Paper

コンパクト同軸型石炭地下ガス化システムにおける燃焼・ガス化の制御に関する研究 *

濵 中 晃 弘[1]　蘇　発 強[2]　板 倉 賢 一[3]　髙 橋 一 弘[4]
佐 藤 孝 紀[5]　児 玉 淳 一[6]　出 口 剛 太[7]

Control of Combustion/Gasification Area with Compact Underground Coal Gasification System

by Akihiro HAMANAKA[a], Fa-qiang SU[b], Ken-ichi ITAKURA[c], Kazuhiro TAKAHASHI[c], Kohki SATOH[c], Jun-ichi KODAMA[d], Gota DEGUCHI[e]

a. Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan (Corresponding author, E-mail: hamanaka@mine.kyushu-u.ac.jp)
b. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, 2001 Century Avenue, Jiaozuo, Henan, 454-003, China
c. Graduate School of Engineering, Muroran Institute of technology, 27-1Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585, Japan
d. Division of Sustainable Resources Engineering, Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan
e. Underground Resources Innovation Network, Kita 47 Higashi 17, Higashi-ku, Sapporo 007-0847, Japan

Underground coal gasification (UCG), a technique used to recover coal energy by the in-situ conversion of coal into gaseous products, enables recovery of coal energy from the potential coal resources abandoned under the ground for either technical or economic reasons. However, it might be difficult to adopt conventional UCG systems in Japan because of geological conditions that are complicated by the existence of faults and folds. Additionally, it is difficult to control the combustion/gasification area during UCG process because the process is invisible. Therefore, a co-axial UCG system that is compact, safe, and flexible to adopt is suggested with monitoring system by means of acoustic emission as an alternative UCG system. This UCG system has superiority in terms of applicability compared to the conventional one, but the recovered energy from the coal is relatively low because the gasification area in a co-axial system is limited around a well. In order to develop co-axial UCG system with high efficiency, the model UCG experiment with a large-scale simulated coal seam were conducted. It has been shown that 1) the gasification period can be extended by adopting proper oxygen inflow, 2) it is possible to control the combustion/gasification area and the product gas quality by controlling the position of oxygen inflow, 3) acoustic emission monitoring is an effective technique to evaluate the combustion/gasification area.

KEY WORDS: Underground Coal Gasification, Potential Coal Reserves, Co-axial UCG System, Combustion/Gasification Control, Acoustic Emission

1. 緒　　言

石炭地下ガス化 (Underground Coal Gasification: UCG) とは，地表における石炭ガス化の概念を地下の石炭層に適用したものである。すなわち，石炭層に注入孔および生産孔のボーリングを穿ち，地表より空気や酸素といった酸化剤を注入しつつ地下の石炭層を原位置で燃焼させることで炭層温度を高め，化学反応を促進させることにより石炭をガス化し，地表で一酸化炭素，水素，メタンを主成分とする可燃性ガスを回収する技術である。UCG によって回収される生成ガスは，従来の天然ガスと比較し発熱量は低いものの (天然ガス : 38 ～ 40 MJ/Nm^3，UCG ガス : 4 ～ 12 MJ/Nm^3)，コンバインドサイクル発電による電力供給 [1-3] や，水素やアンモニアやメタノール等の化学原料の供給源 [4-7] として利用が期待される。UCG は複雑な炭層条件や炭層の深部化等による技術的・経済的な理由からこれまで回収のできなかった未利用石炭資源の有効利用を可能とする技術であり，従来の石炭開発利用技術と比較し，地表設備の簡易化，石炭灰処理問題の解決，CO_2 貯留の可能性等といった点に関して適用の優位性がある [8-10]。

一般に，UCG ではガス化を促進させる酸化剤を注入する注入孔および地下で生じた可燃性ガスを回収する生産孔の 2 本のボーリング孔を炭層に沿って連結 (リンキング) し，注入孔および生産孔の間の石炭層を地下で燃焼・ガス化させる (Fig. 1 (a))。こ

*2017 年 11 月 18 日受付　2018 年 5 月 17 日受理　資源・素材学会平成 27 年度春季大会，平成 28 年度春季大会，平成 28 年度秋季大会において一部発表
1. 正会員 博士 (工学) 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 助教
2. 博士 (工学) 河南理工大学 エネルギー工学科 准教授
3. 正会員 工学博士 室蘭工業大学大学院 工学研究科しくみ情報系領域 教授
4. 正会員 博士 (工学) 室蘭工業大学大学院 工学研究科しくみ情報系領域 助教
5. 工学博士 室蘭工業大学大学院 工学研究科しくみ情報系領域 教授
6. 正会員 博士 (工学) 北海道大学 工学研究院環境循環システム部門 准教授
7. 正会員 工学博士 地下資源イノベーションネットワーク
[著者連絡先] FAX: 092-802-3331 (九大・研究室)
E-mail: hamanaka@mine.kyushu-u.ac.jp
キーワード : 石炭地下ガス化，未利用石炭，同軸型 UCG システム，燃焼・ガス化制御，破壊音計測

DOI http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81
© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan

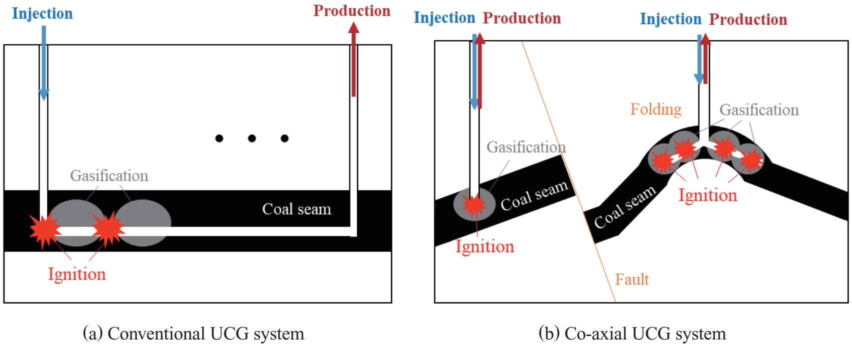


Fig.1　Image of UCG system.

の方式は，炭層条件が良好である場合，安定した可燃性ガスを生成する有効な手法であるが，我が国の複雑な地質構造を有する炭層への適用は困難であると考えられる。したがって，我が国の石炭層に対して UCG の適用を検討する場合，断層や褶曲等が存在する複雑な炭層条件下においても適用可能な柔軟性を有する UCG システムを考案する必要がある。そこで本研究では，コンパクト同軸型 UCG システムの開発の検討を行う。この方式では，燃焼・ガス化を促進させるための酸化剤の注入および地下で発生した可燃性ガスの回収を 1 本のボーリング孔 (同軸孔) を利用して行うため (Fig. 1 (b))，断層や褶曲等が存在する複雑な炭層条件下においても柔軟な適用が可能である。

上述したように，UCG は坑井を利用して地下の石炭層を原位置でガス化し，地表で可燃性ガスとして石炭エネルギーを回収する技術であるが，UCG の反応を制御するには高度な技術を要する[11)]。また，同軸型 UCG システムは燃焼・ガス化領域が坑井周辺に制限されることから，従来の UCG システムと比較してガス化継続時間が短く，生成ガスの発生量が少ないことや，発熱量が小さいといった課題が指摘されてきた[12, 13)]。さらに，地下で生じる燃焼･ガス化プロセスは直接観察できない事象であるため，燃焼・ガス化領域を間接的に常時モニタリングできるような地下の可視化技術の開発も必要になる。上述の背景より，本研究では，1) 同軸型 UCG システムによる燃焼・ガス化領域の拡大および制御，2) 生成ガスの発熱量の改善，3) 破壊音 (Acoustic Emission: AE) 計測による燃焼・ガス化領域の可視化を目的とし，UCG 模型実験を実施した。

2. UCG 模型実験概要

本研究では，大型石炭ブロックを用いた UCG 模型実験を実施することにより，コンパクト同軸型 UCG システムの開発を試みた。UCG 模型実験用石炭ブロックは，実験に使用する鋼製容器に充填後，実験中のガス漏れや外部への放熱を抑制するために，耐熱セメントを石炭ブロックの周辺に流し込むことで作製した。Table 1 に，用いた石炭試料の工業分析値および元素分析値を示す。

本実験では，同軸孔の形状や長さが UCG のガス化継続時間や生成ガスの成分に与える影響を検討するため，Fig. 2 (a) , (b) に示す設計において，大型ブロック炭を用いた UCG 実験を H27 年度および H28 年度に実施した。H27 年度実験では，孔底の形状が異なる 2 種類の同軸型 UCG 実験 (同軸型①，同軸型②) を実施した。同軸型①では, 直径 35 mm の垂直孔のみを 400 mm 穿孔し，同軸型②では，同軸型①と同様の垂直孔に加え，孔底部分に直径 20 mm，長さ 100 mm のそれぞれ直交する 4 本の分岐孔を穿孔した。H28 年度実験では坑井長さを大きくするために，水平孔を用いた同軸型 UCG 実験 (水平同軸型) を実施した。すなわち，鋼製容器の底面から 125 mm の位置に 2,600 mm の深さまで直径 45 mm の水平孔を穿孔した。いずれの孔も，2 インチのガス管を埋め込んでいる口元以外の部分はケーシング等を挿入しない裸孔である。注入管には 1/2 インチ管を用い，注入管の内側から酸化剤を供給し，注入管の外側と孔壁の間から生成ガスを回収するシステムである。

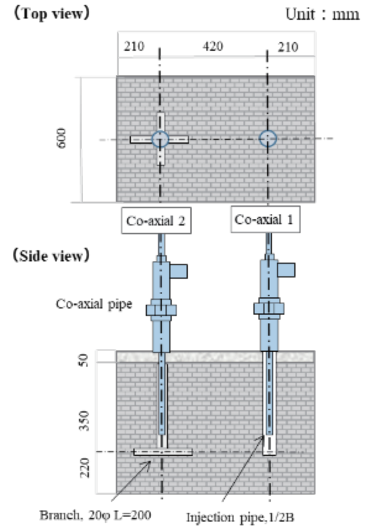
UCG では，石炭を着火し，酸素を供給することでガス化反応が生じる温度にまで石炭温度を上昇させる必要がある。H27 年度実験では，予め燃焼させた 5 ～ 10 mm 程度の粒径の木炭と石炭を孔底に投入することで着火を行った。H28 年度実験では，同軸孔が水平であるため，従来の着火方式の適用が困難であった。そこで，新たな石炭の着火方式として半導体ダイレクトレーザーユニット (M710A45; Omron Laserfront Inc.) を用いたレーザー光による石炭への着火を試みた。すなわち，水平孔の孔底より 150 mm の位置にレーザー出射光学部を設置し，光ファイバケーブルを通じて発振波長 808 nm，定格出力 45 W のレーザー光を孔底の石炭面に出射すると同時に，酸素富化空気 (酸素濃度 90%) を 10 L/min で注入することで石炭の着火を行った。以上に示すように，いずれの実験においても同軸孔の孔底で着火を行い，酸素と空気の混合気体を連続的に注入することで炭層内部の燃焼とガス化を継続させた。なお，気体温度は大気条件と同等であり，同軸型①では酸素濃度 58% で定常注入，同軸型②では酸素濃度 50% で非定常注入 (注入流量は段階的に増大)，水平同軸型では酸素濃度 50% で定常注入とした (Fig. 3 (a) ～ (c))。同軸型①の実験開始後 9 時間経過した時点で注入流量の変動が確認されるが，これは生成ガス側の配管の中に石炭のススが詰まっていたため，配管内清掃を行い, 実験再開時に同軸管の先端位置を調整したためである。同軸型②の開始後 5 時間経過した時点で同軸孔の注入管の先端が溶断していることが判明したために一旦実験を中断したが，同軸管を交換した後に実験を再開した。また，同軸型②ではガス成分の変化 (徐々に可燃性成分が減少) に応じて実験開始後 37 ～ 47 時間経過の間に全注入量を段階的に増大させた。水平同軸型では，実験開始後注入管の先端は孔底から 300 mm の位置で実験を開始したが，炭層温度，生成ガス量，各種ガス濃度を基にガス化反応に進展がないと判断された場合，燃焼・ガス化領域を未反応の石炭部分に移動させることを目的として，注入菅の先端を 300 mm ずつ未反応の石炭部分に順次移動させた。また，最終的に生成ガスは大気に放流したが，着火して燃焼する場合にはフレアリング処理を行い，生成ガスが燃焼しない状態が続いたと判断された場合 (生成ガスの発熱量としておおよそ 3 MJ/Nm^3 以下)，ガス化実験を終了した。

ガス化領域から発生するガスは注入管の外側と孔壁の間を介して回収し，ガスに含まれる水分やタール分を除去した後，マイクロガスクロ (INFICTION Micro GC 3000A) により，酸素 (O_2)，窒

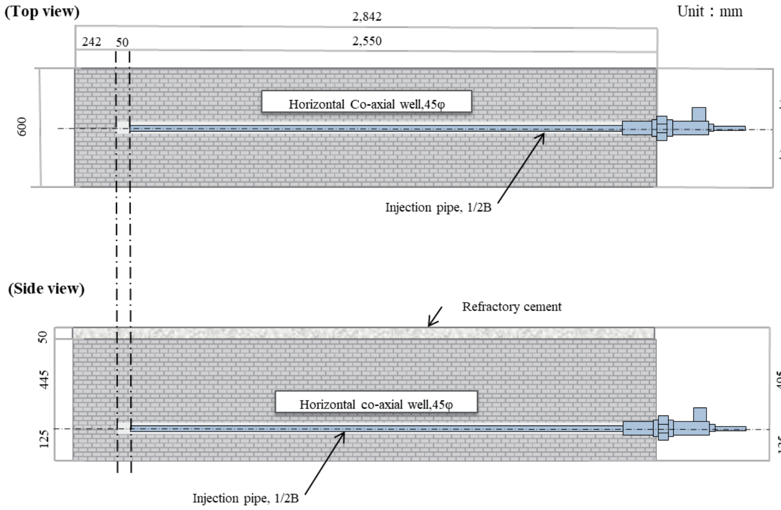
© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan
DOI http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81

Table 1　Proximate and ultimate analyses of the coal.

Calorific value (MJ/kg)	Proximate analysis (wt %)				Ultimate analysis (wt %)				
	Moisture	Ash	Volatiles	Fixed carbon	C	H	N	S	O
32.12	2.1	4.3	43.1	50.5	78.4	5.74	1.44	0.07	9.94

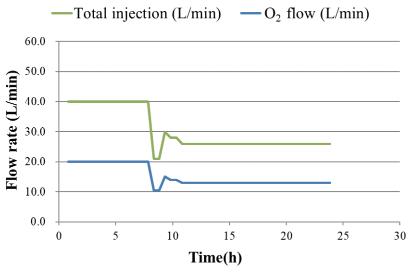


(a) Model UCG experiment in 2015

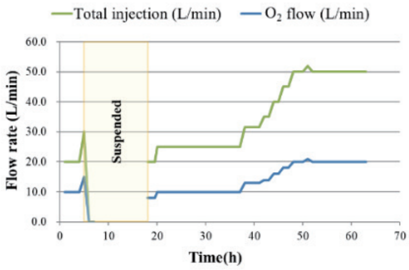


(b) Model UCG experiment in 2016

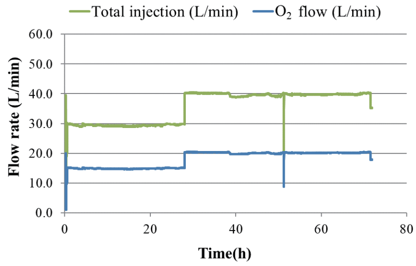
Fig.2　Diagram of UCG model experiment.



(a) Co-axial 1



(b) Co-axial 2



(c) Horizontal Co-axial

Fig.3　Injection conditions.

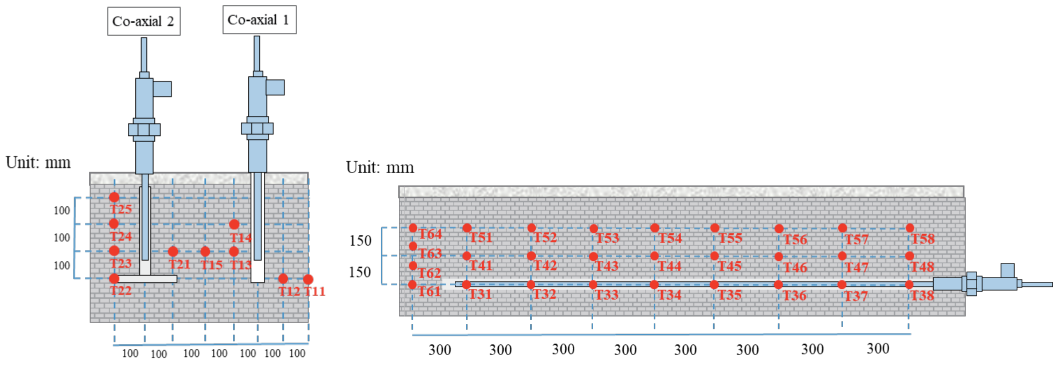
素 (N_2)，二酸化炭素 (CO_2)，水素 (H_2)，一酸化炭素 (CO)，メタン (CH_4)，エチレン (C_2H_4)，エタン (C_2H_6)，プロピレン (C_3H_6)，プロパン (C_3H_8) の濃度を 1 時間毎に計測した。また，実験中は K 型熱電対 (SUS310S; Chino Corp.) およびデータロガー (GL220; GRAPHTEC Corp.) を用いて炭層内温度を計測した。AE に関しては，圧電型加速度トランスデューサ (620HT; Teac Corp.) を用い，アンプ (SA-611; Teac Corp.) によって増幅の後，オシロスコープ (GR-7000; Keyence Corp.) で AE 波形を記録した。Fig. 4 (a) , (b) に熱電対の配置図を，Fig. 5 (a) , (b) に圧電型加速度トランスデューサの配置図を示す。尚，水平同軸型では，AE 計測を行うセンサは，燃焼・ガス化領域が生じていると推定される近傍のセンサを選定し，燃焼・ガス化領域の移動に伴いセンサの位置を変更しながら AE 計測を行った。各実験終了時には，消火のため二酸化炭素あるいは窒素を燃焼・ガス化領域に注入した。実験終了後，石炭ブロック内部に白セメントおよび石膏の混合溶液を流し込み，固化後に試料を切削して垂直断面の状況を観察した。

3. 結果および考察

3・1　炭層内温度分布および生成ガス

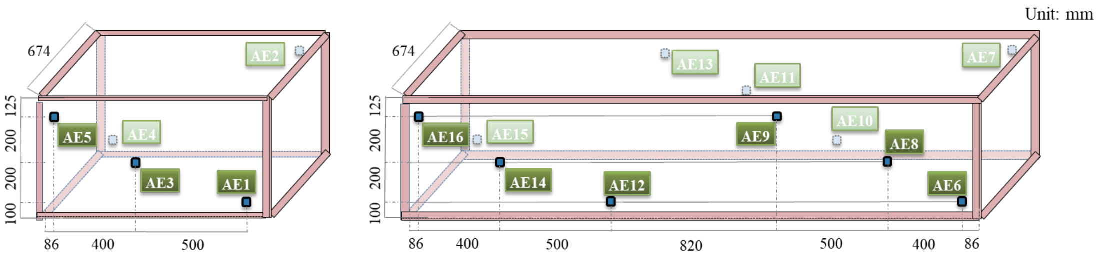
3・1・1　同軸型①　Fig. 6 に温度結果を示す。なお，後述する各計測データは可燃性ガス成分の発生を確認した時点を計測開始時刻として記載している。Fig. 6 より，同軸型①では実験開始後，着火箇所より上部の T14 および T13 が先に急激な温度上昇を示すが，実験開始 10 時間経過後において孔底に近い T12 の温度が急激な上昇を示し，1,200℃にまで達した。これは，実験の初期段階で燃焼・ガス化領域が同軸孔の上部に拡大したことを示しているが，その原因としては，石炭中のクリートの存在が考えられる。すなわち，UCG 実験中に多量のガス漏れも確認されたことから，注入した流体が石炭のクリートの存在によって同軸孔の上部に導かれたため，同軸孔上部で温度が上昇したと考えられる。実験開始 10 時間経過後に同軸孔下部に高温領域が拡大した理由としては，同時刻に配管の清掃および同軸管の先端位置の調整を行ったことに起因すると考えられる。

http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81
© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan



(a) Co-axial 1 and 2　　(b) Horizontal Co-axial

Fig.4　Distributions of thermocouples.



(a) Co-axial 1 and 2　　(b) Horizontal Co-axial

Fig.5　Distributions of acceleration transducers.

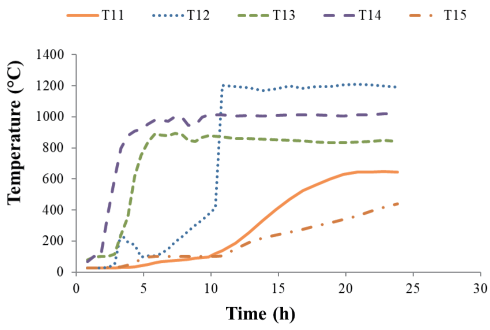


Fig.6　Results of temperature monitoring (Co-axial 1).

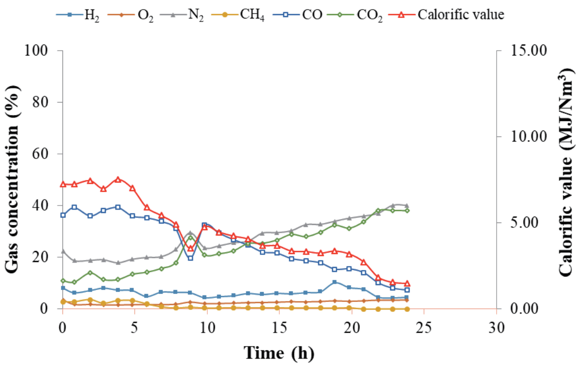


Fig.7　Main compositions and the calorific value of product gas (Co-axial 1).

生成ガス分析結果では，Fig. 7 より，着火直後に UCG の主要な可燃性ガス成分の一つである CO 濃度が 40 ～ 50% に急上昇し，その後徐々に減少している。生成ガスの発熱量は，各実験での生成ガスの CO，CH_4，H_2 などの可燃性ガス成分の濃度から計算で求めることができるが [14]，生成ガスの発熱量も CO 濃度と同様の傾向を示している。一方で CO_2 濃度は徐々に増加する傾向を示し，実験終了時点では CO 濃度は 10% を下回ることに対し，CO_2 濃度は 50 ～ 60% を示している。その他の主要な可燃成分として，H_2 濃度は 6 ～ 7% 前後で推移し，CH_4 濃度は着火後数時間の間 2 ～ 3% で推移した後，検出されなくなった。ここで，H27 年度実験では，熱伝導度型検出器であるマイクロガスクロのキャリアガスとしてヘリウムガスを使用したが，ヘリウムをキャリアガスとして使用して H_2 を測定する場合，両者の熱伝導の差が小さいためにフィラメント温度やガス濃度の条件によっては気体の熱伝導の観点から濃度の大きい H_2 の定量が困難であることが指摘されている [15]。したがって，ここで得られた H_2 濃度は参考程度に留めておく必要がある。同軸型①のガス化継続時間は 24 時間であった。

3・1・2　同軸型②　Fig. 8 に示す温度結果より，同軸型②では実験開始から 2 時間経過した時点で孔底に最も近い T21 の温度が急上昇し，5 時間経過後にはピーク温度の 1,300℃に達した。その後，注入管の溶断のために実験が一時中断し，新しい注入管を挿入して実験を再開したが，実験再開後においても温度の上昇傾向に変化はなく，孔底から最も離れている T25 以外の熱電対の温度の上昇が著しいことより，同軸型①より広範囲に燃焼・ガス化領域が拡大したと考えられる。同軸型①および②において，初期段階に燃焼・ガス化領域が拡大した位置に違いが生じた原因は明らかではないが，石炭中のクリートの存在，注入酸化剤の酸素濃度，同軸型②で孔底に設置した分岐孔がその要因であると考えられる。また，同軸型②では，実験開始後 37 ～ 47 時間経過の間に段階的に流量を増大させた時間帯において，温度の上昇が著しいこともわかる。

Fig. 9 に示す生成ガス分析結果によると，実験開始当初のガス濃度の変化や発熱量の変化は同軸型①と類似しているが，注入流

© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan
http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81

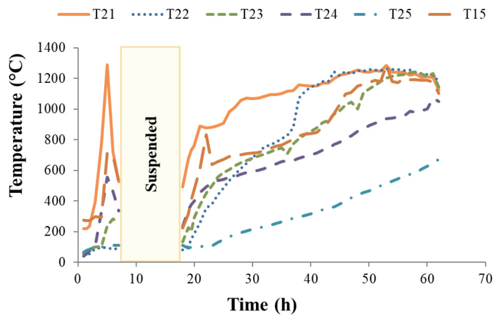


Fig.8 Results of temperature monitoring (Co-axial 2).

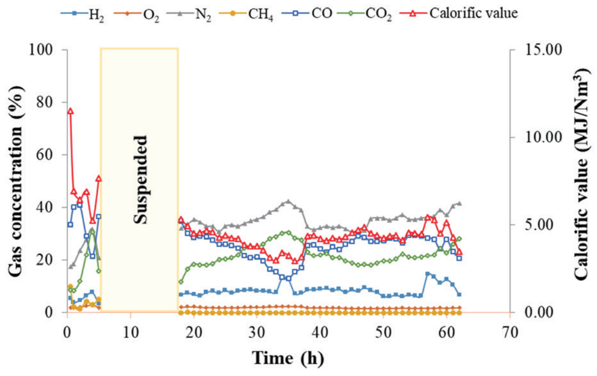
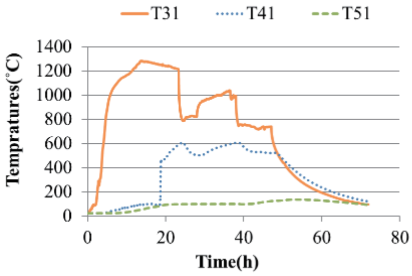
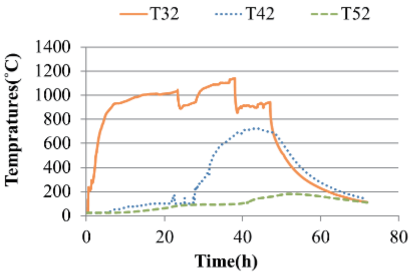


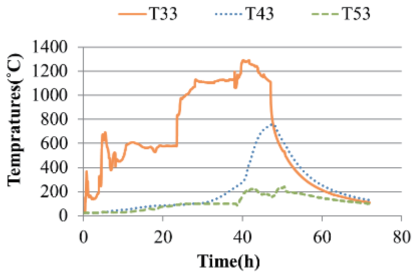
Fig.9 Main compositions and the calorific value of product gas (Co-axial 2).



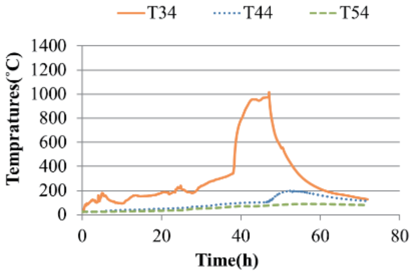
(a) T31 ～ T51



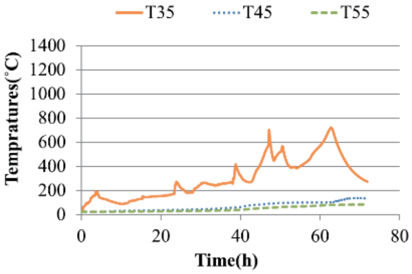
(b) T32 ～ T52



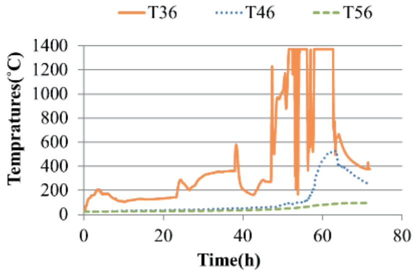
(c) T33 ～ T53



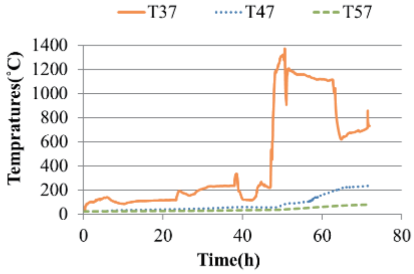
(d) T34 ～ T54



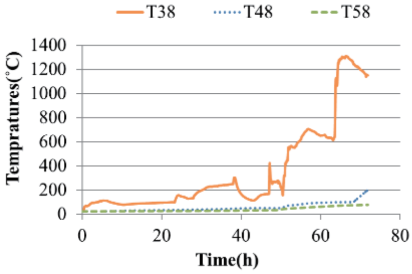
(e) T35 ～ T55



(f) T36 ～ T56



(g) T37 ～ T57



(h) T38 ～ T58

Fig.10 Results of temperature monitoring (Horizontal Co-axial).

量を増大させた 37 時間付近において，CO 濃度および発熱量が再び上昇し，実験終了近くまで CO 濃度は 25% ～ 30% を，発熱量は 4.5 MJ/Nm^3 を維持している。また，CO_2 濃度も増加することなく 20% 前後の濃度を維持する時間帯が継続している。上記の結果の原因として，

1) 石炭の燃焼・ガス化範囲が拡大することに伴い，石炭の反応比表面積も増大すると考えられるが，酸素の注入量を増大させることで，増大した石炭の反応比表面積に対する安定したガス化に必要な酸化剤が供給されたこと
2) 注入される酸素の量が増大したことで燃焼・ガス化反応が促進されたこと [16]

が考えられる。すなわち，UCG の段階に応じて適切な注入条件を適用することで，燃焼・ガス化を長時間継続させることが可能であると考えられる。また，H_2 濃度は 7 ～ 8% 前後で推移し，CH_4 濃度は着火後数時間の間 4 ～ 5% で推移した後，検出されなくなったが，同軸型①と同様に H_2 濃度に関してはガス分析にヘリウムをキャリアガスとして使用したため，詳細な検討はできない。同軸型②のガス化継続時間は 51 時間であった。

3・1・3　水平同軸型　水平同軸型では，注入管の先端は孔底から 300 mm の位置で実験を開始したが，着火 24 時間後，38 時間後，47 時間後，63 時間後に注入管の先端を 300 mm ずつ未反応の石炭部分に向かって順次移動させた。Fig. 10 (a) ～ (h) に示

http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81
© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan

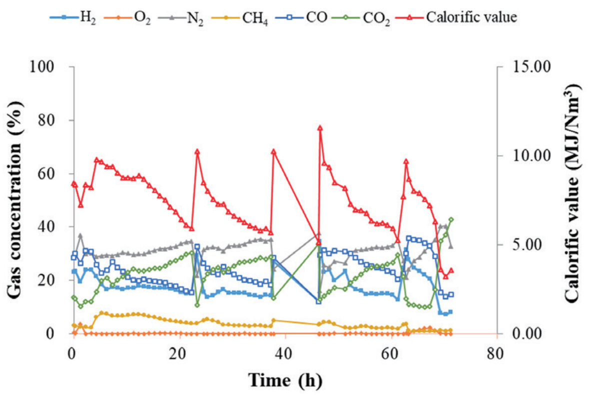


Fig.11　Main compositions and the calorific value of product gas (Horizontal Co-axial).

す温度結果より，着火後は T31 および T32 の温度が急激に上昇したが，実験が進むにつれて高温領域が T38 側へ移動していることがわかる。また，T31 ～ T38 における温度の上昇傾向は注入管の位置を移動させた時間と合致しており，着火直後では T31 および T32 が，24 時間後では T33 が，38 時間後では T34 が，47 時間後では T35，T36，T37 が，63 時間後では T38 が急激な温度上昇を示していることがわかる。これは，注入管の移動により酸化剤が供給される領域に変化が生じ，その結果，燃焼・ガス化領域も移動したためと考えられる。したがって，注入管の位置を移動させることで，未反応石炭部分における燃焼・ガス化反応を促進できると考えられる。また，同軸孔から 150 mm 上部に設置されている T41 ～ T48 において，T44，T45，T47，T48 の最高温度がその他の熱電対と比較して小さいことから，炭層の中央部周辺の石炭には燃焼・ガス化領域が進展しなかったと推測される。これは，後述の実験後断面調査結果で示すが，炭層の中央部付近では同軸孔周辺に多量のセメントが混入していたためである。さらに，同軸孔から 300 mm 上部に設置されている T51 ～ T58 において，すべての熱電対の温度は 200℃以下であるため，どの段階においても高温領域は水平孔周辺に制限され，上部まで燃焼・ガス化が進展しなかったことがわかる。

Fig. 11 に生成ガスの分析結果を示す。同図において，38 ～ 47 時間および 50 ～ 51 時間の時間帯は計測機器の不具合が生じたため，データが取得できなかった。生成ガスの成分の変化は，熱電対による温度計測と同様，注入管の位置を移動した直後に大きく変動している。すなわち，CO, CH_4, H_2 などの可燃性ガスの濃度は，試験開始直後あるいは注入管を移動させた直後に急激に増加し，その後徐々に減少していく傾向がある。一方，CO_2 濃度の変化は可燃性ガスの変化と相対する傾向にあり，可燃性ガス成分が急増する時点で急激に減少し，可燃性ガス成分が徐々に減少する時期には徐々に増加する傾向にある。実験中の発熱量の変動は，可燃性ガスの主要成分である CO，CH_4，H_2 の濃度変化と同傾向を示している。すなわち，注入管を移動させると発熱量は 10 MJ/m^3 前後にまで急激に回復するが，時間経過とともに徐々に 5 MJ/m^3 にまで低下する傾向が認められる。なお，H28 年度の実験では，マイクロガスクロにおける H_2 濃度の定量にアルゴンガスをキャリアガスとして使用しており，結果の信頼性は十分にあると考えられる。水平同軸型のガス化継続時間は 72 時間であった。

3・1・4　高効率な同軸型 UCG システム　Table 2 に各実験のガス化継続時間および UCG プロセスによる生成ガスの発熱量と成分の平均値を示す。同表より，まず，同軸型①および同軸型②を比較すると，生成ガスの平均発熱量は同等であるものの，ガス化継続時間が同軸型②の方が長いことがわかる。これは，前述のとおり，酸化剤として注入酸素量を増大させたことにより安定したガス化を維持できたためである。また，水平同軸型では同軸型①，②と比較して，ガス化継続時間が長く，生成ガスの平均発熱量も高いことから，高品質な生成ガスを長時間回収できたといえる。すなわち，酸化剤の注入位置を移動させることにより燃焼・ガス化領域を広範囲に進展させることができ，尚且つ，未反応石炭部分を随時ガス化することにより高品質な生成ガスを回収できたことがわかる。ここで，従来の UCG システムの一つである CRIP (Controlled Retractable Injection Point) においても，炭層に沿って水平に掘削された注入孔の着火箇所を制御することにより，炭層中に新しいガス化炉が形成することができるため，高品質の生成ガスを回収できることが指摘されている [17～19]。したがって，同軸型 UCG システムにおいても，炭層傾斜に沿った同軸孔を形成し，燃焼・ガス化領域の位置を制御することで，高品質な生成ガスが回収できる高効率な UCG システムの開発が可能になると考えられる。燃焼・ガス化領域の位置を制御するためには，燃焼・ガス化領域の情報を得る必要があるが，UCG サイトにおいて地下の炭層の温度を多数測定することは現実的に困難である。そこで，次節では，燃焼・ガス化領域を推定するための手法として，AE 計測を用いた炭層内部のモニタリングに関して検討を行う。

3・2　AE 計測による炭層の内部モニタリング

3・2・1　AE 波形の初動検出手法　AE 波の解析では，震源の標定や波形解析による震源メカニズムの推定等が行われるが，これらの解析では AE 波の到達時間，すなわち AE 波初動部の読み取りがその解析の出発点となる。本研究では，大野ら [20] の報告を参考に，検出波形に直接赤池情報量基準 (AIC：Akaike Information Criterion) を適用し，下記の式 (1)，(2) より AIC が最小を示す点を信号到達時間とした。

Table 2　Gasification period and average product gas composition for each test.

	Co-axial 1	Co-axial 2	Horizontal Co-axial
Gasification period (h)	24	51	72
Calorific value (MJ/Nm^3)	4.49	4.64	7.47
H_2 (%)	6.29	8.19	18.06
CO (%)	25.14	25.94	24.18
CH_4 (%)	1.05	0.51	3.68
CO_2 (%)	23.50	21.41	21.91
C_2H_4 (%)	0.14	0.15	0.47
C_2H_6 (%)	0.01	0.02	0.27
C_3H_6 (%)	0.01	0.01	0.11
C_3H_8 (%)	0.00	0.00	0.06

© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan
http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81

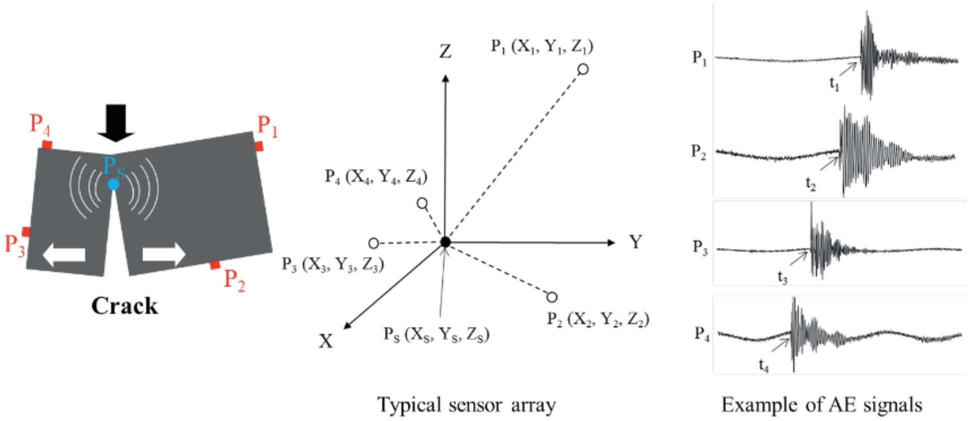


Fig.12　Typical sensor array and AE signals.

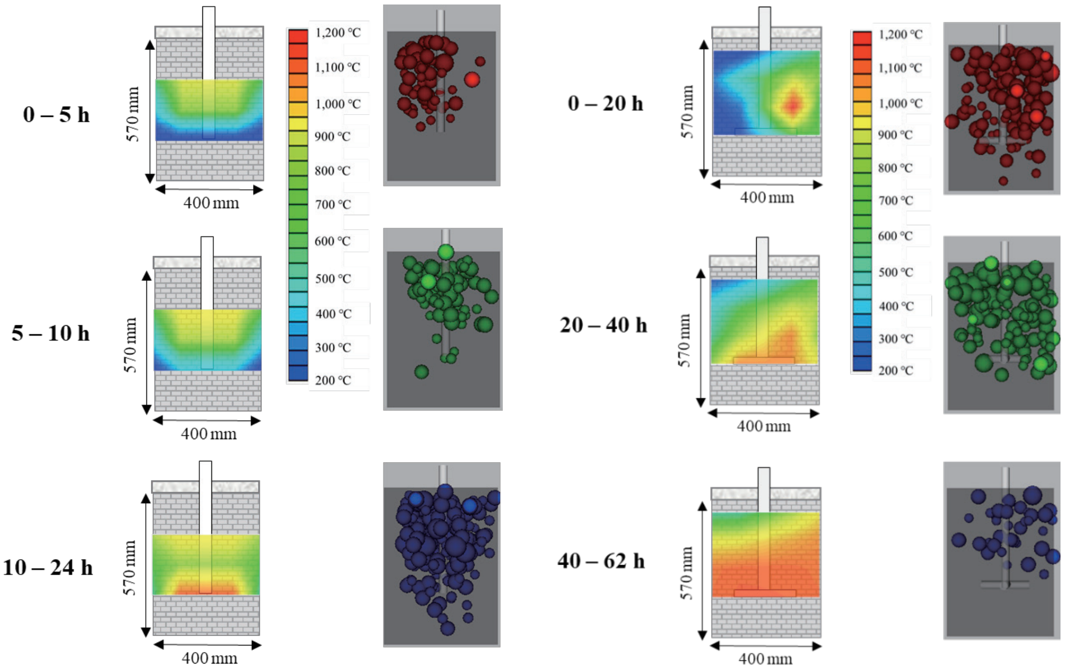


Fig.13　Compared results between maximum temperature and AE monitoring (Co-axial 1, 2).

$$AIC(k) = k \cdot \log\{\mathrm{var}(X[1,k]\}+(N-k)\cdot \log\{\mathrm{var}(X[k,N])\} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$P1 = T_k\{Min(AIC(k)\}-\Delta T \quad \cdots\cdots (2)$$

ここで，N はデータ総数，k は全データを 2 区間に分割する境界点，X は波形振幅値の点群データ，var $(X[1, k])$ は波形振幅値 X_1 から X_k の分散，var $(X[k, N])$ は波形振幅値 X_k から X_N の分散，$P1$ は AE 波の到達時間，$T_k\{Min(AIC(k))\}$ は AIC が最小を示す時間，ΔT はサンプリング間隔を示す。

AE の震源標定解析では，ある AE 事象に対して AE 信号がセンサに到達した時刻 t_i，センサの座標 (X_i, Y_i, Z_i)，また試料中を伝播する弾性波速度 V_i より AE 震源座標 (X, Y, Z) および AE 発生時刻 T を算出する。Fig. 12 より，AE 波動の到達時間と AE 発生源およびセンサ間の距離に関して式 (3) が得られる。

$$\sqrt{(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2+(Z-Z_i)^2} = V_i(t_i-T)\ (i=1,2,\cdots,n) \quad \cdots (3)$$

本研究では，反復最小二乗法により，(3) 式より震源座標の最確値を算出した [21, 22]。

3・2・2　AE 計測による燃焼・ガス化領域の推定　UCG プロセス中に発生する AE は燃焼・ガス化領域周辺の熱応力や石炭の軟化溶融後の硬化過程によって発生するき裂に起因すると考えられる [23, 24]。したがって，AE 震源標定結果と炭層内温度分布を比較することにより，AE 計測による燃焼・ガス化領域の推定を試みる。また，実験後断面調査により燃焼･ガス化領域を推定し，AE 震源標定結果と比較することで，AE 計測による燃焼・ガス化領域の推定の妥当性に関して検討する。

Fig. 13 (a) , (b) に同軸型①，②の炭層内最高温度分布と AE 震源標定結果を示す。炭層内最高温度分布に関して，熱電対温度計測結果を用いることで，ある時間帯における炭層内の最高温度のコンター図を作成した。尚，温度データが不足している箇所においては，周辺の熱電対の温度データから線形補間により炭層の温度を推定した。AE 震源標定結果に関して，震源位置を球で表し，球の大きさは相対エネルギー (AE 波の最大振幅値の二乗値として定義)，すなわち破壊の規模の大きさを反映している。

http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81
© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan

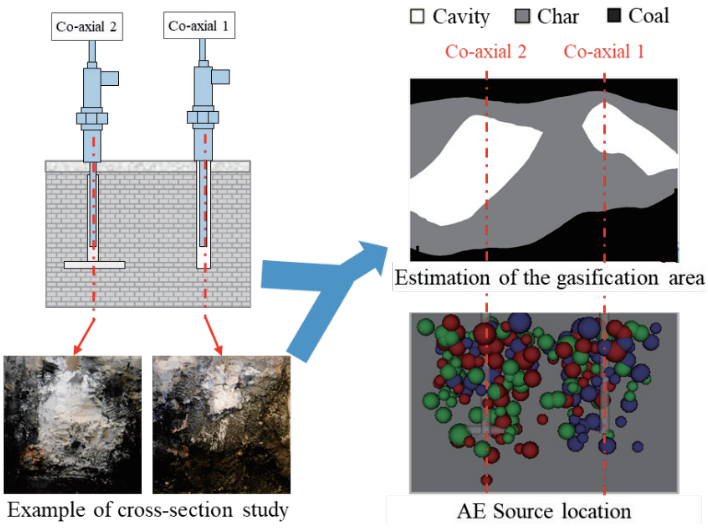


Fig.14　Compared results between estimation of post-gasification area and AE source location (right: Co-axial 1, left: Co-axial 2).

同軸型①では，実験開始後 10 時間経過まで同軸孔上部に高温領域が拡がっており，その後，同軸孔下部に高温領域が移動していることがわかる。AE 震源標定結果においても同様の傾向が示されており，実験開始後 10 時間経過まで同軸孔上部において AE 震源が集中しており，その後，同軸孔を中心として下部の方まで AE 震源が拡大していることがわかる。同軸型②では，同軸型①とは温度の上昇傾向が異なり，実験の初期段階において同軸孔下部を中心として広範囲において温度が上昇し，同軸孔上部に向けて高温領域が移動していることがわかる。AE 震源標定結果においても，実験開始後初期段階において AE 震源が同軸孔下部も含めた広範囲に分布しており，時間経過に伴い同軸孔上部に移動していることがわかる。実験開始後 40 – 62 時間までの間は同軸孔下部においても高温領域が拡大しているにもかかわらず，AE 震源が標定されていないが，これは，同軸型②が広範囲に燃焼・ガス化領域が拡大したため，実験の後半では燃焼・ガス化に伴う石炭試料の内部構造の変化により正確に計測できる AE が少なくなったためであると考えられる。このような問題は，センサを適当な位置に配置することによって解決できると考えられる。

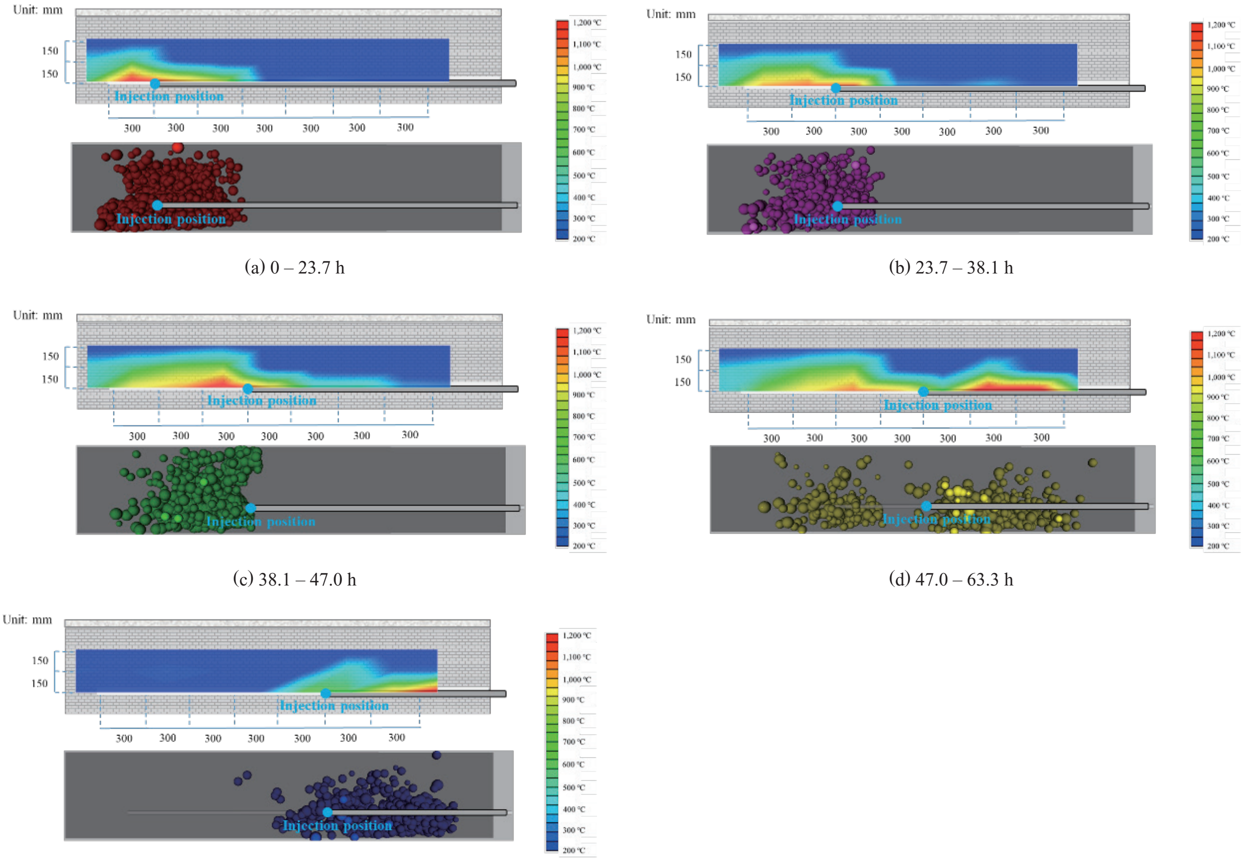
Fig. 14 は，実験後断面調査により推定された温度コンター図と同様の断面 (断面の前後 50 mm 内の震源分布) における燃焼・ガス化領域および AE 震源標定結果を示している。燃焼・ガス化領域に関して，ガス化実験終了後，石炭ブロック内部に白セメントおよび石膏の混合溶液を流し込み固化させた後，100 mm 毎にブロック炭試料を切削して垂直断面の状況を観察することによって，実験後空洞およびガス化反応により変質した石炭 (チャー : Char) の部分を推定した。同図より，標定された AE 震源はおおむね燃焼・ガス化領域内に分布しており，AE 計測による燃焼・ガス化領域推定の妥当性が伺える。

Fig. 15 (a) ～ (e) に水平同軸型の AE 震源標定結果と炭層内最高温度分布を示す。なお，AE 震源標定結果は炭層内温度を測定した断面の前後 50 mm 内の震源分布を示している。水平同軸型では，注入管の位置を移動させることで高温領域の移動に伴い AE 震源の位置も移動していることがわかる。これは，注入管の移動により酸素の供給される領域も移動するため，その結果，燃焼・ガス化領域も移動するためと考えられるが，本結果は，燃焼・ガス化領域の移動に関しても AE 計測による推定が可能であることを示唆している。また，どの段階においても，炭層上部における温度上昇が確認されなかったが，同図中の左側の炭層をガス化している時間帯 (0 – 47.1 時間) においては，広範囲に高温領域が拡がっており，それに対応して AE 震源も広範囲に分布していることがわかる。さらに，炭層の中央部付近 (47.0 ～ 63.3 時間の注入管の先端位置周辺) において，温度の上昇傾向が著しく小さく，AE 震源もほとんど標定されていない。

以上の結果を踏まえ，Fig. 16 に切断面から再構成した燃焼・ガス化領域および AE 震源標定結果の比較を示す。まず，炭層上部において温度上昇が確認されなかったが，実験後断面調査より，水平同軸型の実験では上部に頁岩が挟み層として賦存しており，その結果，炭層上部において燃焼・ガス化が促進されなかったと考えられる。また，AE 震源が広範囲に分布している左側の炭層では，燃焼・ガス化領域が頁岩層の境界まで拡大していることも認められる。さらに，炭層の中央部付近においても温度上昇が小さく，AE 震源も分布していなかったが，これは，同軸孔周辺の石炭の賦存状況の違いが燃焼・ガス化領域に影響していると考えられる。すなわち，炭層の中央部付近である C 断面では同軸孔周辺に多量のセメントが混入しており，石炭が占める面積が小さいため，燃焼・ガス化が促進されなかったと考えられる。炭層中へのセメントの混入は，炭層の周囲をセメントで充填する際に，石炭塊の境界の間隙に充填セメントが入り込んだ結果である。以上より，水平同軸型においても，燃焼・ガス化領域と AE 震源分布は調和的であるため，AE 計測により燃焼・ガス化領域がおおむね推定できると考えられる。尚，水平同軸型では，同軸型②とは異なり実験の後半においても多くの AE 震源が標定されているが，これは，ガス化実験の進展に伴い，AE 計測に用いるセンサの位置を変更しており，その結果，燃焼・ガス化に伴う石炭試料の内部構造の変化による AE 計測精度への影響を小さくすることができたためである。すなわち，同軸型②の結果に対する考察で指摘したように，センサを適当な位置に配置することにより UCG 中の炭層の内部状況を正確にモニタリングできることが確認できた。

以上より，いずれの実験においても AE 震源標定結果が炭層内の温度分布および推定された燃焼・ガス化領域と調和的であったため，UCG 実験中の炭層内の監視に AE 計測が活用できることを確認した。AE は炭層内部における熱応力や高温条件下における石炭の軟化や溶融といった内部構造変化に伴うき裂の発生と同時に放出されると考えられるため，リアルタイムに地下の状況を監視することが可能である。また，UCG 中の破壊活動を制御する

© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan
DOI http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81



(a) 0 – 23.7 h　(b) 23.7 – 38.1 h　(c) 38.1 – 47.0 h　(d) 47.0 – 63.3 h　(e) 63.3 – 72.0 h

Fig.15　Compared results between maximum temperature and AE monitoring (Horizontal Co-axial).

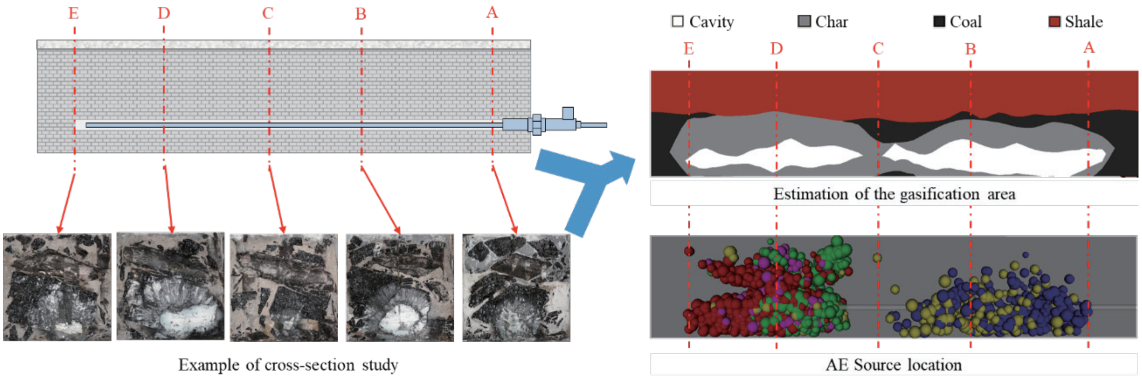


Fig.16　Compared results between estimation of post-gasification area and AE source location (Horizontal Co-axial).

ことは，地下水汚染，ガス漏れ，地盤沈下等の周辺環境に与える環境リスクを低減させることにも寄与する。したがって，リアルタイムの監視と制御を行う AE 計測システムを構築することは，燃焼・ガス化領域の制御のみならず，安全で低環境負荷な UCG システムに貢献すると考える。

5. 結　　言

同軸型 UCG システムは，我が国のような断層や褶曲の多い地質条件下でも適用できるコンパクトな UCG システムである。しかしながら，UCG では，坑井を利用して UCG の反応を制御することが困難であることや，同軸型 UCG システムでは従来の UCG システムと比較して燃焼・ガス化領域が小さく，生成ガスの発熱量も小さいといった課題が指摘されていた。以上の課題を克服するため，UCG 模型実験を行った結果，同軸型 UCG システムにおいて，酸素注入流量を増大させることで燃焼・ガス化領域を拡大することができ，注入管の位置を移動させることでガス化領域の制御が可能であると同時に，生成ガスの発熱量も改善されることが明らかとなった。また，UCG プロセス中の AE 震源標定結果と炭層内温度分布結果は対応しており，実験後断面における震源分布においても結果が調和的であったため，AE 計測により燃焼・ガス化領域が推定できる可能性が示された。したがって，本研究で得られた知見により，同軸型 UCG システムにおける燃焼・ガス化を制御することが可能であると考える。

謝辞　本研究は，北海道三笠市，文部科学省の特別経費「大学の特性を生かした多様な学術研究機能の充実」，室蘭工業大学環

© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan

境科学・防災研究センター，三美鉱業株式会社および石炭地下ガス化研究会（JUCG）の支援，協力を受けた。関係各位に，お礼申し上げる。さらに，本研究の一部はJSPS科研費JP15H02332の助成をうけたものである。ここに記して厚くお礼を申し上げる。

References

1） P. Peng, B. Kirtipal, and N. Junior: energy & fuels. **30**（2016）, 2111-2118.
2） F. Mao: Nat. Gas Ind. **3**（2016）, 312-322.
3） V. Prabu, and K. Geeta: Energy **84**（2015）, 672-683.
4） D. K. Surya, and V. Prabu: Int. J. Hydrogen Energy. **42**（2017）, 14089-14102.
5） L. Shu-qin, W. Yuan-yuan, Z. Ke, and Y. Ning: Min. Sci. Technol. **19**（2009）, 389-394.
6） Y. Lanhe, Z. Xing, L. Shu-qin, Y. Li, and Z. Weilian: Int. J. Hydrogen Energy. **33**（2008）, 1275-1285.
7） N. C. Nakaten, T. Kempka: energies. **10**（2017）, 1643; doi:10.3390/en10101643.
8） D. Burchart-Korol, P. Krawczyk, K. Czaplicka-Kolarz, A. Smolinski: Fuel. **173**（2016）, 239-246.
9） D. M. Yang, N. Koukouzas, M. Green, Y. Sheng: J. Energy Inst. **89**（2016）, 469-484.
10） A.hadse, M. Qayyumi, S. Mahajam, P. Aghalayam: Energy, **32**（2006）, 2061-2071.
11） S. Shimada, H. Koide, and K. Yamazaki: Journal of MMIJ, **126**（2010）, 602-607.
12） F. Q. Su, A. Hamanaka, K. Itakura, G. Deguchi, K. Satoh, and J. Kodama: energy & fuel. **31**（2017）, 154-169.
13） A. Hamanaka, F. Q. Su, K. Itakura, K. Satoh, K. Takahashi, G. Deguchi, J. Kodama, and K. Ohga: Modern Environmental Science and Engineering, **2**（2016）, 599-605.
14） F. Q. Su, K. Itakura, G. Deguchi, K. Ohga, and M. Kaiho: Journal of MMIJ, **131**（2015）, 203-218.
15） K. Snavely, and B. Subramaniam: J. Chromatogr. Sci. **36**（1998）, 191-196.
16） A. Hamanaka, F. Q. Su, K. Itakura, K. Takahashi, J. Kodama, and G. Deguchi: energies. **10**（2017）, 238; doi:10.3390/en10020238
17） C. Yong, L. Jie, W. Zhangqing, Z. Xiaochun, F. Chenzi, L. Dongyu, and W. Xuan: Appl. Energy. **131**（2014）, 9-19.
18） A. W. Bhutto, A. A. Bazmi, and G. Zahedi: Prog. Energy Combust. Sci., **39**（2013）, 189-214.
19） E. Shafirovich, and A. Varma: Ind. Eng. Chem. Res. **48**（2009）, 7865-7875.
20） K. Ohno, S. Shimozono, Y. Sawada, and M. Ohtsu: Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection. **57**（2008）, 531-536.
21） M. Honma，N. Kasugaya：Jigen Kaiseki Saisyo Jijoho to Jikken shiki，（Korona sya, Tokyo, 1986）.
22） H. R Hardy: Acoustic Emission/Microseismic Activity Volume 1，（Principles, Techniques and Geotechnical Applications. USA: CRC Press / The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, 2003）.
23） F. Q. Su, T. Nakanowataru, K. Itakura, K. Ohga, and G. Deguchi: energies. **6**（2013）, 2386-2406.
24） J. Kodama, R. Naka, T. Tatekawa, A. Hamanaka, K. Itakura, and G. Deguchi: Proc. of MMIJ Fall Meeting. **4**（2017）.

© 2018 The Mining and Materials Processing Institute of Japan
DOI http://doi.org/10.2473/journalofmmij.134.81