

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15492

研究課題名（和文）石炭地下ガス化における反応領域の高度モニタリング・制御に向けたAE技術の適用

研究課題名（英文）Application of Acoustic Emission Technology for Monitoring and Control of Gasification Area in Underground Coal Gasification

研究代表者

濱中 晃弘（Hamanaka, Akihiro）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：20758601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：石炭地下ガス化におけるガス化反応領域のモニタリング手法として、破壊音（Acoustic Emission: AE）計測の適用を試みた結果、複数のセンサーでAE計測を行うことにガス化反応が生じている高温領域の場所の特定が可能であり、AE震源標定解析を行うことで高温領域の拡大をモニタリングすることが可能であることが明らかとなった。現地でのUCGにおいて、1,000℃以上にも達する炭層内の温度を直接計測することは困難であると考えられるが、AE計測は炭層から離れた場所で計測が可能であるため、AE計測によりUCGの反応領域のモニタリングが可能になり、ガス化領域の制御にも有用であると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石炭地下ガス化（UCG）では、水素を始めとした種々の可燃性ガスが回収できるが、生成ガス成分の制御にはガス化領域の温度状況を把握する必要がある。本研究課題では石炭の温度状況とAE活動の発生に関して基礎的な実験により検討を行うことで、学術的な観点からUCG中のAE活動が生じる温度状況を明らかにした。資源開発に伴うモニタリング手法の開発は、周辺環境への影響を低減させるためにも重要であるという観点から社会的意義も有すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research discusses the application of acoustic emission (AE) measurement as a monitoring technique of the gasification area in Underground Coal Gasification (UCG). As a result, the location to occur the gasification reaction can be detected by AE measurement with multiple sensors, and the expansion of the gasification area can be also monitored by AE source location analysis. AE measurement technique is effective as a monitoring tool of the gasification area in UCG instead of temperature monitoring considering the temperature monitoring in actual UCG field is difficult.

研究分野：資源開発

キーワード：石炭地下ガス化 UCG AE計測 ガス化制御 未利用エネルギー資源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

石炭地下ガス化 (UCG: Underground Coal Gasification) は地下の未採掘の石炭資源を原位置で直接ガス化することで可燃性ガスとしてエネルギーを回収する方法であり、石炭は化石燃料の中でも可採埋蔵量が多いことから、UCG により未利用エネルギー資源の有効利用による大量のエネルギー資源の確保につながると考えられる。本手法では、地下のガス化反応領域を広範囲に拡大することでガス化効率が改善され、周辺環境に影響が出ない程度まで反応領域の拡大を制御することで環境の安全が保たれる。しかしながら、地下で生じるガス化プロセスは目には見えない事象であり、UCG 中の炭層温度は 1,000°C を超える高温であることを考慮すれば、安全かつ高効率な UCG システムの確立にはガス化反応領域の高度なモニタリング・制御が必要である。

### 2. 研究の目的

UCG では高温領域の熱応力により炭層内の破壊活動が生じることから、破壊活動監視の手法の一つとして破壊音 (AE: Acoustic Emission) 計測が地下のガス化領域のモニタリングとして有効と考えられる。しかしながら、UCG 中に発生する AE 活動がいつ・どのような温度状況下で生じたのかということは解明されていない。そこで、本研究では UCG 中の AE 活動がどのような炭層の温度状況あるいは温度変化で生じるのかということをはっきりとすることを目的としている。また、UCG では、注入する注入剤の注入流量や酸素濃度によって炭層内の温度分布は異なるため、異なる注入条件によって形成される炭層内の温度分布が UCG 中に発生する AE 活動に与える影響を明らかにし、ガス化反応領域の制御に向けた注入剤の注入条件の指針を得ることも目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、上述の研究目的を達成するために、石炭の温度および温度変化が AE 活動に与える影響に関して検討する 1) 石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験、UCG の注入条件によって形成される石炭の温度状況と AE 活動の関係を明らかにする 2) 小規模 UCG 模型実験を実施した。

1) 石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験 (図 1) では、1 辺 20 cm 程度に成形した石炭ブロック供試体に設置したカートリッジヒーターの温度や温度上昇速度を変化させることで、石炭ブロック内に温度勾配の異なる温度分布を形成させ、石炭ブロック内の温度変化や AE 発生数などを計測した。また、複数のセンサーから得られた AE 波形データを用いて震源標定解析を行い、熱電対で得られた石炭供試体の温度分布と比較することで、AE 震源と温度分布の関係に関して検討を行った。

2) 小規模 UCG 模型実験 (図 2) では、一辺 20 cm 程度に成形した石炭ブロックに熱電対および AE センサーを設置し、異なる注入条件で模擬 UCG 実験を複数回実施することで、石炭の温度分布と AE 活動の関係を検討した。

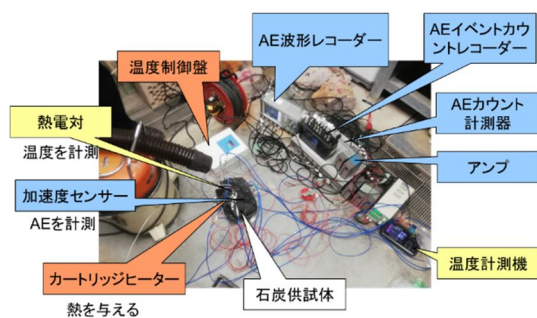


図 1 石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験



図 2 小規模 UCG 模型実験

### 4. 研究成果

#### 1) 石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験

熱源の温度を 550 として段階的に加熱した場合、熱電対より得られた温度結果および AE イベント数の結果を図 4 に示す。同図の AE イベント数の結果より、急激な熱源の温度変化がある場合に多数の AE が発生していることが分かる。これは、AE の発生は石炭の温度変化と関係があることを示しており、AE を計測することで石炭の温度変化を把握することが可能であることを示している。また、熱源からの距離が異なる加速度センサーで計測された AE イベント数に着目すると、熱源との距離に近いほど AE イベント数が多いことが確認される。すなわち、AE イ

ベント数を計測することで、加速度センサーの位置から石炭中の温度変化が生じている場所がある程度特定可能になると考えられる。次に、熱源の温度が 50~150 および 400 以上の場合に多数の AE が発生していること分かる。また、400 以上で発生する AE イベント数の方が、低温である場合と比較して多いことが分かる。この理由は定かではないが、石炭の品質にもよるが一般に石炭のガス化は 400 付近から活発になることを考慮すれば、50~150 においては石炭の熱膨張により AE が発生し、400 以上においては石炭のガス化が生じたことにより AE が発生したと考えられる。以上まとめると、AE 計測により UCG 中に生じる石炭の温度変化が生じた場所をある程度予測することが可能であり、AE イベント数が顕著に増大している場合は、石炭のガス化が生じる温度まで増大していることを示していることが考えられる。

図 4 (a) (b) に熱源の温度が 50~150 および 400 以上の場合における AE 震源標定結果および熱源からの距離の違いによる震源標定数の割合を示す。まず、震源標定数に着目すると、熱源の温度が 50~150 の場合と比較して、400 以上である場合において震源標定数が多いことが確認される。これは、前節の AE イベント数の結果と調和的である。次に、熱源からの距離の違いによる震源標定数の割合に着目すると、熱源の温度が 400 以上と高温である場合の方が、熱源から離れた場所で AE の震源が標定されていることが分かる。これは、石炭試料内の温度によるものと考えられ、実験後半の熱源の温度が高温である場合の方が、石炭試料の広範囲にわたり高温領域が拡大したため、中心から離れた位置に震源が多く標定されたと考えられる。すなわち、本結果より AE 計測によって高温領域の拡大をモニタリングすることが可能であることが示唆される。

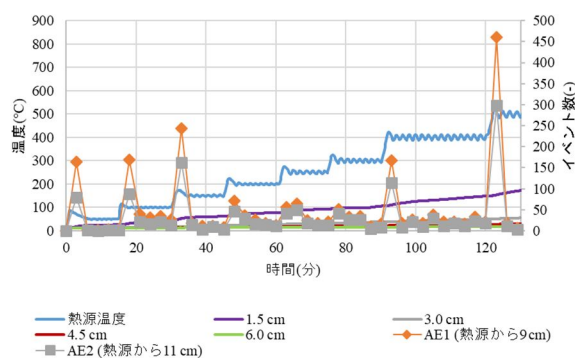
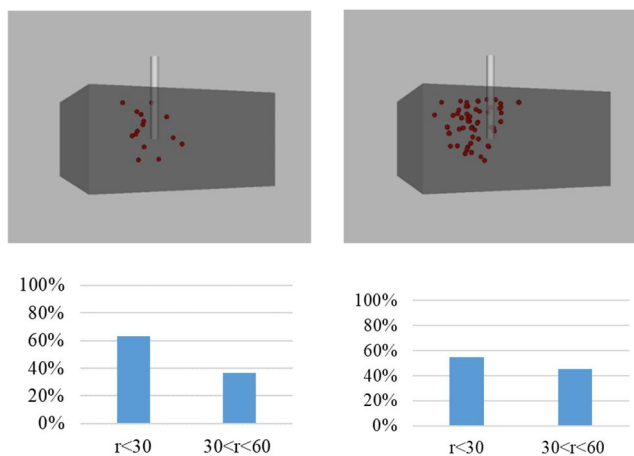


図 3 炭層内温度と AE イベント数の関係 (熱源の温度を 550 として段階的に加熱した場合)



(a) 0 ~ 45 分 (熱源の温度が 50~150 の場合) (b) 90 ~ 150 分 (熱源の温度が 400 の場合)

図 4 AE 震源標定結果および熱源からの距離の違いによる震源標定数の割合

( r は熱源から震源までの距離 ( mm ) )

## 2) 小規模 UCG 模型実験

図 5 に示す試料内温度について、酸素濃度の増大に伴い、生産管側に形成されていた高温領域が注入管側に形成されるようになることが分かる。また、注入流量の増大に伴い、高温領域の形状は変わらないまま、広範囲に拡大することが分かる。これらの原因は定かではないが、酸素濃度の違いにより、石炭試料内で生じる酸化反応の反応速度が影響を与えていると考えられる。すなわち、酸素濃度の増大に伴い酸化反応の反応速度が増大したため、酸素濃度が 70% の条件では酸素が注入管側で早く消費される結果となり、注入管側に高温領域が形成されたと考えられる。図 6 に示す AE イベント数について、酸素濃度が異なる場合における AE イベント数の結果より、酸素濃度が 30% の場合は生産管側の AE センサーで AE イベントが多く発生し、酸素濃度が



50%の場合は注入管側で AE イベントが多く発生していることが分かる。また、注入流量が異なる場合、注入流量の増大に伴う AE イベントの発生箇所の移動は確認されない。これらの結果は、先述の温度分布結果と調和的であり、高温領域が形成された場所において多くの AE イベントが発生していることを示している。すなわち、石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験においても確認されたとおり、複数のセンサーで AE イベント数を計測することで急激な温度変化が生じている場所を捉えることが可能であるため、ガス化反応が生じている領域をある程度予測することが可能であると考えられる。

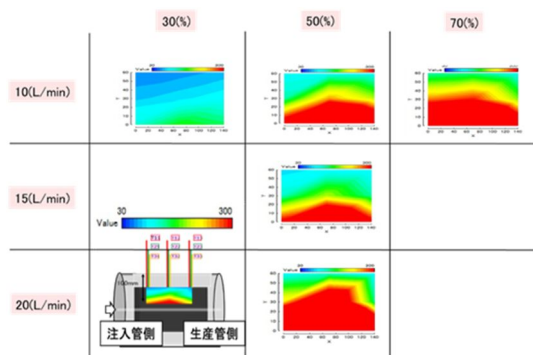


図 5 石炭試料内の最大温度分布図

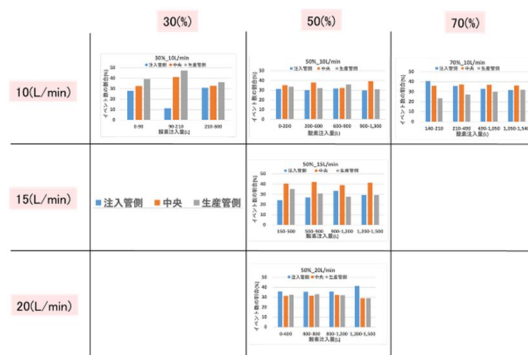
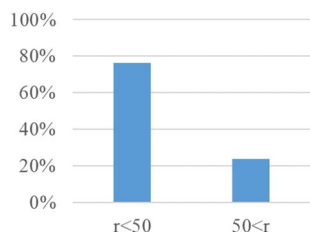
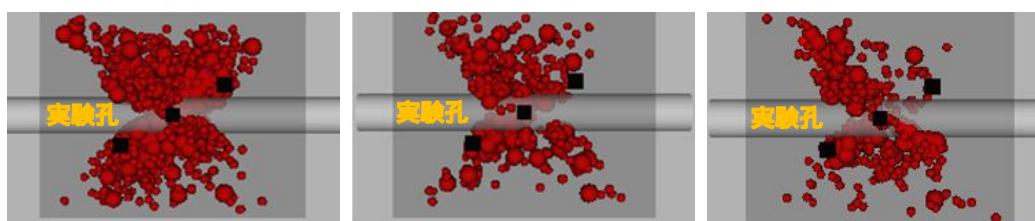
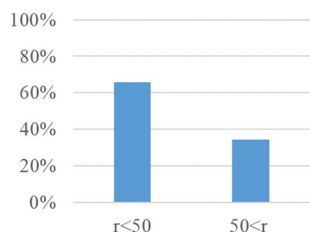


図 6 AE イベント発生数

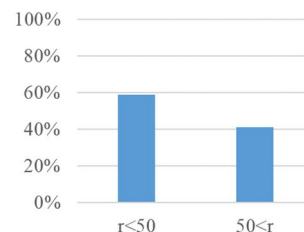
次に、AE 震源標定結果の一例として、酸素濃度 50% で注入流量が 10 L/min の条件における結果を図 7 (a) ~ (e) に示す。まず、震源標定数に着目すると、実験の初期の段階において震源標定数が多いことが確認される。これは、実験開始後が最も石炭の温度変化が大きいためであると考えられる。次に、実験孔からの距離の違いによる震源標定数の割合に着目すると、実験の後半になるにつれ、実験孔から離れた場所で AE の震源が標定されていることが分かる。この結果も、石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験と調和的であり、実験後半の熱源の温度が高温である場合の方が、石炭試料の広範囲にわたり高温領域が拡大したため、中心から離れた位置に震源が多く標定されたと考えられる。すなわち、UCG プロセスにおいても AE 計測によって高温領域の拡大をモニタリングすることが可能であることが示唆される。実際の UCG 操業において、1,000 以上にも達する炭層内の温度を直接計測することは困難であると考えられるが、AE 計測は炭層から離れた場所で計測が可能であるため、本研究のように計測結果を統計的に解析することで UCG の反応領域のモニタリングが可能になり、注入条件を変更することによるガス化領域の制御に向けた有用な技術になると考えられる。



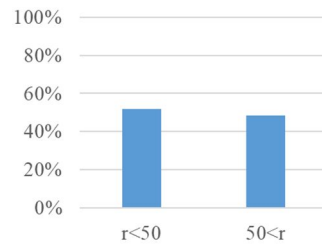
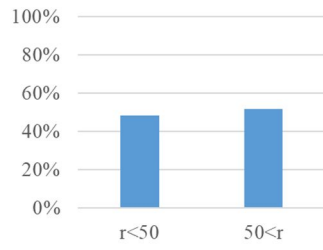
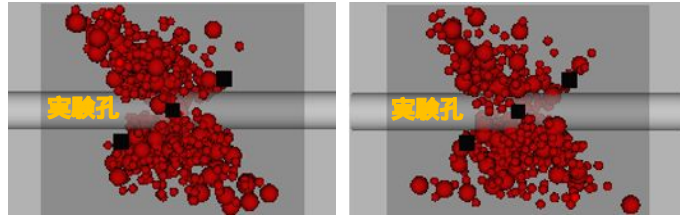
(a) 0~300 L 酸素注入後



(b) 300~600 L 酸素注入後



(c) 600~900 L 酸素注入後



(d) 900~1200 L 酸素注入後

(e) 1200~1500 L 酸素注入後

図7 AE震源標定結果および実験孔からの距離の違いによる震源標定数の割合

( $r$ は熱源から震源までの距離 (mm))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mao Pisith、Shimada Hideki、Hamanaka Akihiro、Wahyudi Sugeng、Oya Jiro、Naung Naung	4. 巻 9
2. 論文標題 Three-Dimensional Analysis of Gate-Entry Stability in Multiple Seams Longwall Coal Mine Under Weak Rock Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Earth Science Research	6. 最初と最後の頁 72～83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5539/esr.v9n1p72	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Akihiro HAMANAKA, Fa-qiang SU, Ken-ichi ITAKURA, Kazuhiro TAKAHASHI, Jun-ichi KODAMA, Gota DEGUCHI	4. 巻 2019
2. 論文標題 Large-scale Laboratory Experiment on Development of Underground Coal Gasification with Horizontal Well	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 5th ISRM YSRM2019 and REIF2019	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 瀨中晃弘，板倉賢一，蘇発強，児玉淳一，出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化（Underground Coal Gasification）におけるAE計測に関する二、三の考察
3. 学会等名 資源・素材学会北海道支部 春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉賢一，高橋一弘，瀨中晃弘，出口剛太，児玉淳一
2. 発表標題 木質バイオマスチップを用いたハイブリッド石炭地下ガス化（H-UCG）について
3. 学会等名 資源・素材学会北海道支部 春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南貴之, 児玉淳一, 菅原隆之, 瀧中晃弘, 板倉賢一, 高橋一弘
2. 発表標題 UCG大型模型試験の燃焼空洞周辺に発生したき裂の分析
3. 学会等名 資源・素材学会北海道支部 春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉賢一, 高橋一弘, 瀧中晃弘, 出口剛太, 児玉淳一
2. 発表標題 木質バイオマスチップを用いたハイブリッド石炭地下ガス化 (H-UCG)に関する基礎研究
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧中晃弘, 板倉賢一, 蘇我強, 高橋一弘, 佐藤孝紀, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 水平孔を用いた石炭地下ガス化 (UCG) システムにおける炭質および注入条件が生成ガス成分および反応領域に与える影響
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉淳一, 中良介, 南貴之, 菅原隆之, 瀧中晃弘, 出口剛太, 板倉賢一, 福田大祐, 藤井義明
2. 発表標題 加熱と冷却により発生する石炭内のき裂の観察
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南貴之, 中良介, 児玉淳一, 菅原隆之, 瀧中晃弘, 出口剛太, 板倉賢一, 福田大祐, 藤井義明
2. 発表標題 放熱境界条件下での小規模UCG模型実験の熱応力解析
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉賢一, 瀧中晃弘, 蘇発強, 出口剛太, 高橋一弘, 児玉淳一
2. 発表標題 AE計測による石炭地下ガス化炉周辺の温度分布推定について
3. 学会等名 資源・素材学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真壁良充, 瀧中晃弘, 板倉賢一, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太, Widodo Nuhindro Priagung, 島田英樹
2. 発表標題 石炭地下ガス化模型実験による水平孔を用いた同軸型UCGシステムにおけるガス化効率の評価
3. 学会等名 資源・素材学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken-ichi ITAKURA, Akihiro HAMANAKA, Fa-qiang SU, Gota DEGUCHI, Kazuhiro TAKAHASHI, Jun-ichi KODAMA
2. 発表標題 Acoustic Emission (AE) Thermometry for Underground Coal Gasification (UCG)
3. 学会等名 Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Pisith MAO, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Akihiro HAMANAKA, Sugeng WAHYUDI, Jiro OYA, Naung NAUNG
2. 発表標題 Numerical Investigation on Gate-Entry Stability of Trial Panel in Indonesia Longwall Coal Mine
3. 学会等名 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshimitsu MAKABE, Akihiro HAMANAKA, Ken-ichi ITAKURA, Jun-ichi KODAMA, Gota DEGUCHI, Nuhindro Priagung WIDODO, Budi SULISTIANTO, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA
2. 発表標題 Experimental Study on Co-axial System with A Horizontal Well of Underground Coal Gasification to Evaluate Gasification Efficiency
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀧中晃弘, 眞壁良充, 板倉賢一, 笹岡孝司, 島田英樹, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化におけるガス化反応領域のモニタリングのためのAE計測の適用性に関する基礎的研究
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南貴之, 児玉淳一, 菅原隆之, 瀧中晃弘, 出口剛太, 板倉賢一, 高橋一弘, 藤井義明, 福田大祐
2. 発表標題 加熱、冷却による石炭試料の亀裂の発生と成長の観察
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	出口 剛太 (Deguchi Gota)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インドネシア	Institute of Technology Bandung		