

石炭地下ガス化におけるAE 計測モニタリングの可能性

濱中, 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

石井, 悠真
九州大学大学院工学府地球資源システム工学専攻 : 修士学生

板倉, 賢一
室蘭工業大学大学院しくみ解明系領域寄附講座「未利用資源エネルギー工学講座」 : 特任教授

蘇, 兪強
河南理工大学エネルギー工学科 : 准教授

他

<https://hdl.handle.net/2324/7234046>

出版情報 : Journal of MMIJ. 140 (6), pp.50-57, 2024-06-28. The Mining and Materials Processing Institute of Japan

バージョン :

権利関係 : © 2024 The Mining and Materials Processing Institute of Japan





石炭地下ガス化における AE 計測モニタリングの可能性 *

濱 中 晃 弘¹ 石 井 悠 真² 板 倉 賢 一³ 蘇 発 強⁴
 児 玉 淳 一⁵ 笹 岡 孝 司⁶ 島 田 英 樹⁷ 出 口 剛 太⁸

Applicability of Acoustic Emission Monitoring to Estimate Gasification Area in Underground Coal Gasification

Akihiro HAMANAKA^{a*}, Yuma ISHII^a, Ken-ichi ITAKURA^b, Fa-qiang SU^c, Jun-ichi KODAMA^d,
 Takashi SASAOKA^a, Hideki SHIMADA^a and Gota DEGUCHI^e

- a. Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan (*Corresponding author, E-mail: hamanaka@mine.kyushu-u.ac.jp)
 b. Endowed Research Laboratory of Un-mined Mineral Resources and Energy Engineering, College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran 050-8585, Japan
 c. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, 2001 Century Avenue, Jiaozuo, Henan, 454-003, China
 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) is a promising process for recovering energy from potential underground coal resources as combustible gases such as hydrogen and carbon monoxide. The gasification process that occurs underground is an invisible phenomenon, and the temperature in the underground gasification reaction zone can be over 1,000 °C. Therefore, the visualization/monitoring of the gasification area of UCG plays an important role in the development of a highly efficient, safe, and low environmental impact UCG system.

This article reviews the possibility of monitoring high-temperature gasification reaction zones in UCG using Acoustic Emission (AE) technique. AE monitoring can be used as a real time monitoring technique because AE can be detected at the same time when the cracks occur due to the gasification, indicating that it gives an advance warning immediately if the extensive damage occurs. The challenges and future prospects for estimating the gasification reaction area by AE technique are also addressed at the end of article.

KEY WORDS: Underground Coal Gasification, Untapped Coal Resources, Unutilized Energy, Combustion/ Gasification Control, Acoustic Emission, Hydrogen

1. 緒 言

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。UCG は地表の石炭ガス化炉の技術を地下に転用したものであり、注入剤や炭層の温度状況を制御することで、石炭より

回収される生成ガスの成分を制御することが可能である。例えば、水蒸気を注入剤として石炭をガス化することで水素成分を多く回収することができ^{1,2)}、炭層温度を高くすることによりガス化反応が促進され発熱量の高い可燃性ガスを回収することが可能である³⁾。また、石炭は燃焼時の CO₂ 発生量が他の化石燃料と比較して多いといった欠点があるが、UCG では地下の炭層を原位置でガス化するため、ガス化後に必然的に形成される大量の空隙に CO₂ を貯留することで、地球温暖化ガス排出の削減効果が期待される⁴⁻⁶⁾。

UCG では石炭を地下の原位置で直接燃焼させるため、反応領域の温度は 1,000 °C 以上を示す。したがって、高温条件下における炭層の破壊が発生することでガス化領域が拡大し、UCG のガス化反応が広範囲で促進されることで可燃性ガスの生成量の増大が期待される。その一方で、UCG に伴い揮発性有機化合物が副産物として生成することを考慮すれば、ガス化領域が過剰に拡大することによってガス漏れ、地盤沈下、地下水汚染など周辺環境に多大な影響を与えることになる⁷⁾。例えば、1972 年～1979 年にかけてアメリカの Wyoming 州の Hoe Creek で実施された UCG のパイロット試験では、深度 30-40 m の帯水層である石炭層を対象としたが、地下ガス化炉の圧力を増大させたことにより、地盤沈下および揮発性有機化合物による地下水汚染が甚大となっ

*2023 年 9 月 27 日受付 2024 年 1 月 19 日受理

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. 九州大学大学院 工学府地球資源システム工学専攻 修士学生
 3. 正会員 工学博士 室蘭工業大学大学院 しくみ解明系領域 寄附講座「未利用資源エネルギー工学講座」特任教授
 4. 博士 (工学) 河南理工大学 エネルギー工学科 准教授
 5. 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
 6. 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 准教授
 7. 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 教授
 8. 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・濱中)
 hamanaka@mine.kyushu-u.ac.jp
 キーワード：石炭地下ガス化，未利用エネルギー，燃焼・ガス化制御，AE 計測，水素

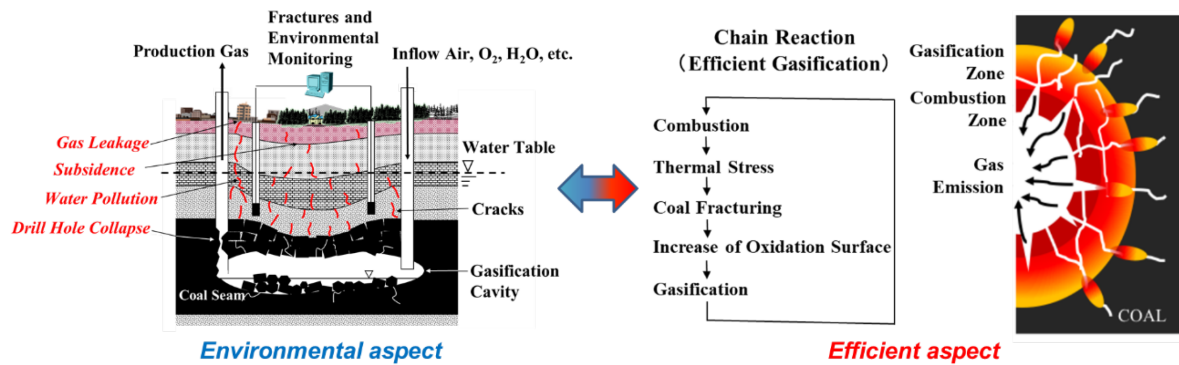


Fig. 1 Environmental/efficient aspect of fracturing during UCG.

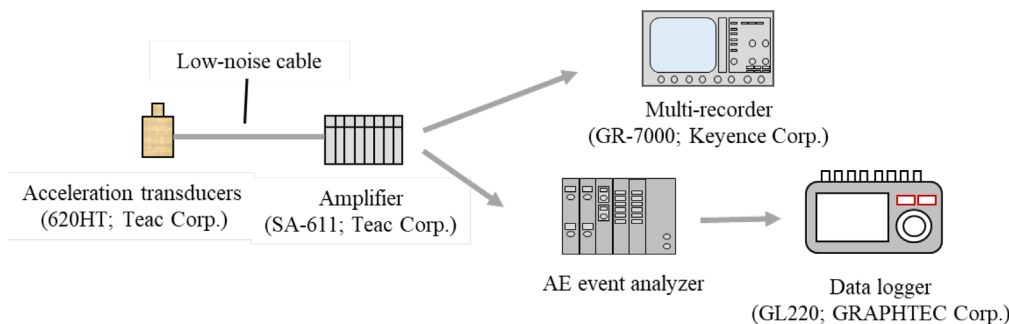


Fig. 2 AE measurement devices.

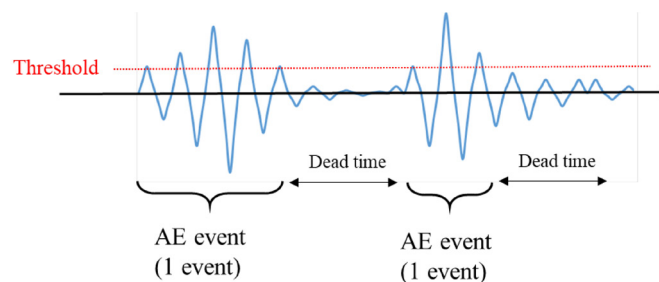


Fig. 3 Definition of AE event with the dead time.

た⁸⁻¹⁰⁾。以上より、Fig. 1 に示すように UCG 中のガス化領域の拡大はガス化効率の改善と環境問題のリスクの相反するどちらの側面においても重要であることから、高効率かつ安全で低環境負荷な UCG システムの開発には、UCG のガス化領域の可視化が重要な役割を担う。

ここで、UCG では燃焼領域周辺の熱応力により生じる炭層内の破壊活動によりガス化領域が進展するため、破壊活動監視の手法の一つとして破壊音 (AE: Acoustic Emission) 計測が有効と考えられる。本論説では、AE 計測による UCG 中のガス化反応領域の推定の可能性に関してこれまでの成果を整理するとともに、今後の課題と展望に関する見解を述べる。

2. AE 計測システム

AE とは、物体の内部のき裂の発生、進展などの破壊現象に伴い、蓄積されていたエネルギーの一部が弾性波となって解放される弾性波動現象として定義される。AE は、材料内部の欠陥や異常を早期に検知するための手法として広く用いられており、航空

機や自動車などの品質管理や鉱山現場では大深度地下における坑道の崩落リスクの評価などに適用されている。定義に従えば、固体材料内部で弾性波動を発生させる現象はすべて AE の発生原因と分類されるが、本論説では、脆性材料における微小な破壊現象を対象としている。

AE 計測システムは、検出対象となる材料や計測環境により、使用センサや信号の処理システムが変わるが、計測システムの一例として、我々の研究で使用されている計測システムを Fig. 2 に示す。AE 波形を受信するセンサは、耐熱性の高い高温型型の加速度トランスデューサー (620HT; Teac Corp.) である。加速度センサで受信した信号は、ローノイズケーブルによりアンプ (SA-611; Teac Corp.) に送信され増幅された後、特別に設計された AE イベント解析装置およびデータロガー (GL220; GRAPHTEC Corp.) で AE イベントを計測し、高速マルチレコーダ (GR-7000; Keyence Corp.) で AE 波形を記録する。アンプでは、ノイズ除去のためハイパスフィルター (high-pass filter) を 5 Hz に設定する。AE イベント解析装置では、Fig. 3 に示すようにしきい値と不感時間 (dead

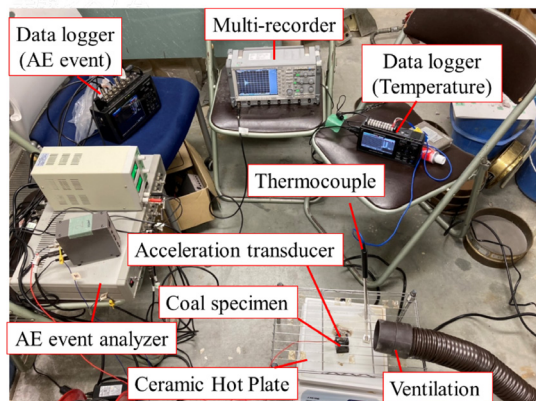


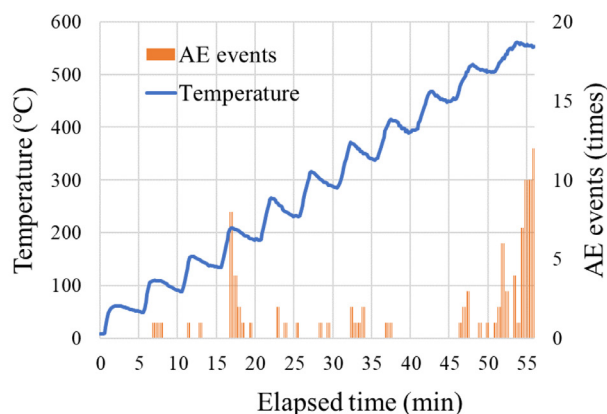
Fig. 4 Experimental setup of the coal heating experiment.

time)を設定してAEの個数を計数するパルス方式による解析が行われ、しきい値は 0.5 m/s^2 、不感時間は 10 ms とする。高速マルチレコーダでは、入力信号がしきい値を横切った時に波形を記録するエッジトリガを適用し、複数のセンサを使用する際にはORトリガを適用する。しきい値は、 0.1 m/s^2 とする。ここで、高速マルチレコーダのしきい値はAEイベント計測時より小さい値を設定しているが、これはAEイベントではノイズをイベントとして計測することを極力避ける必要があるものの、高速マルチレコーダでは後に行う震源標定解析の精度を向上させるために多量のデータを要するため、しきい値を小さくしている。サンプリング間隔は $1 \sim 2 \mu\text{s}$ で記録長さを2500個とし、プリトリガは20%とする。

複数の1軸センサから得られるAE波形を用いた震源標定解析では、AE波到達時間の読み取りとして検出波形に赤池情報量基準(AIC: Akaike Information Criterion)を適用し¹¹⁾、AE信号がセンサに到達した時刻、センサの座標、試料中を伝播する弾性波速度を用いた反復最小二乗法により、AE震源座標の最確値を算出する¹²⁾。3軸センサによるAE震源標定解析では、P波およびS波のAE波の到達時間をしきい値により求めた後、x軸、y軸、z軸の波形データを3次元空間にプロットし、P波部分の波形データから最小二乗法により伝播方向を求める。そして、P波とS波の到達時間および伝播速度の差から、AE震源を算出する。

3. 石炭加熱時に生じる微小破壊

石炭は加熱した際に、温度上昇に伴う石炭内部の異なる鉱物粒子の線形膨張係数の差や生成ガスの膨張圧によって石炭マトリクス内で破壊が進展すること¹³⁾や、 500°C 以上の条件において軟化した石炭が再固化してセミコークスになる場合に内部のガス気泡の結合や脱気により石炭が収縮する熱収縮が生じること¹⁴⁾により、微小破壊が生じる。また、石炭の質により温度は異なるが、石炭は 100°C 程度までは微小き裂の生成により浸透率が増大し、 $200 \sim 300^\circ\text{C}$ 程度までの温度帯で熱膨張の影響などで浸透率が減少するものの、 300°C 以上の温度帯において、石炭から熱分解ガスが生成する時に試料中の大きな細孔が大幅に増加することで空隙率が増大し、浸透率が増大することも示されている¹⁵⁻¹⁷⁾。さらに、粉炭を乾留してコークスを製造するプロセスで発生する環芳香族分子の縮重合による再固化や、ガス気泡の結合や脱気による体積収縮¹⁸⁾が塊炭においても生じることが明らかにされてい

Fig. 5 Temperature and AE events²¹⁾.

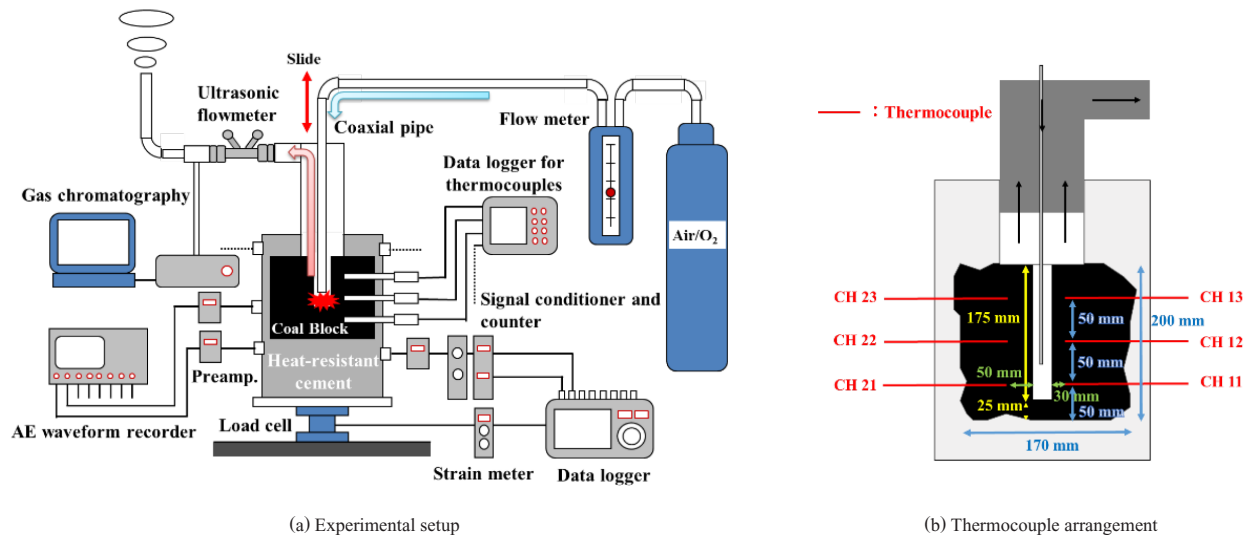
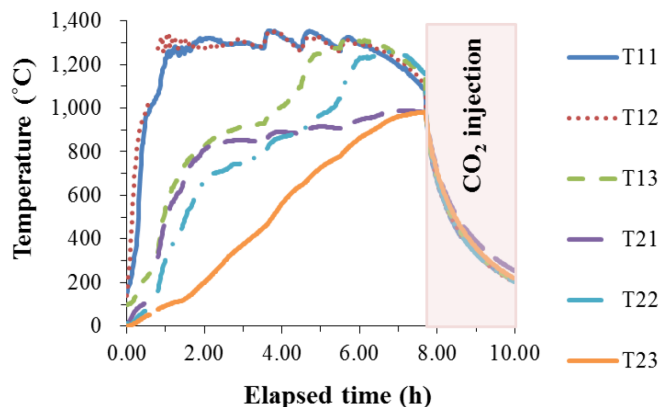
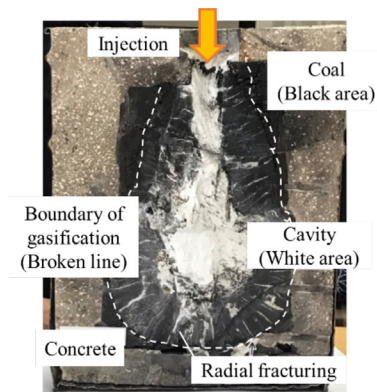
る¹⁹⁾。

石炭の加熱に伴い検知される微小破壊も、石炭の温度に影響を受ける。石炭は 300°C 程度までの低温の温度帯では空気や水蒸気の膨張圧の影響や加熱に伴う内部構造の変化により微小破壊が生じ、 $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ の高温の温度帯では、石炭の熱分解の影響により微小破壊が生じる。そして、高温の温度帯において多数のAE活動が計測される²⁰⁾。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ために、Fig. 4に示す石炭加熱実験を実施した²¹⁾。本実験では、一辺 40 mm の大きさに成形した石炭に耐熱性パテを用いて加速度トランスデューサーを設置し、セラミックホットプレートで石炭を加熱している間にAEのイベント数を計測した。石炭の加熱条件は、 50°C から 550°C まで5分ごとに 50°C ずつ段階的に加熱する方式とした。実験結果として、Fig. 5に示す熱電対より得られた温度結果およびAEイベント数の結果より、 200°C および 450°C 以上の温度帯において、AEイベントが増大した。これは、前述の石炭の加熱に伴う内部構造の変化や熱分解ガスなどの生成ガスによって発生する微小破壊をAE計測により捉えていると考えられる。

以上より、石炭の加熱中には温度変化に伴う石炭の内部構造の変化や熱分解ガスの発生により微小破壊が生じ、それらの破壊活動をAE計測により検知することが可能であるため、UCGにおいてもAE計測により石炭がガス化反応を起こしている高温領域を把握することが可能であると考えられる。

4. UCG中の反応領域モニタリング

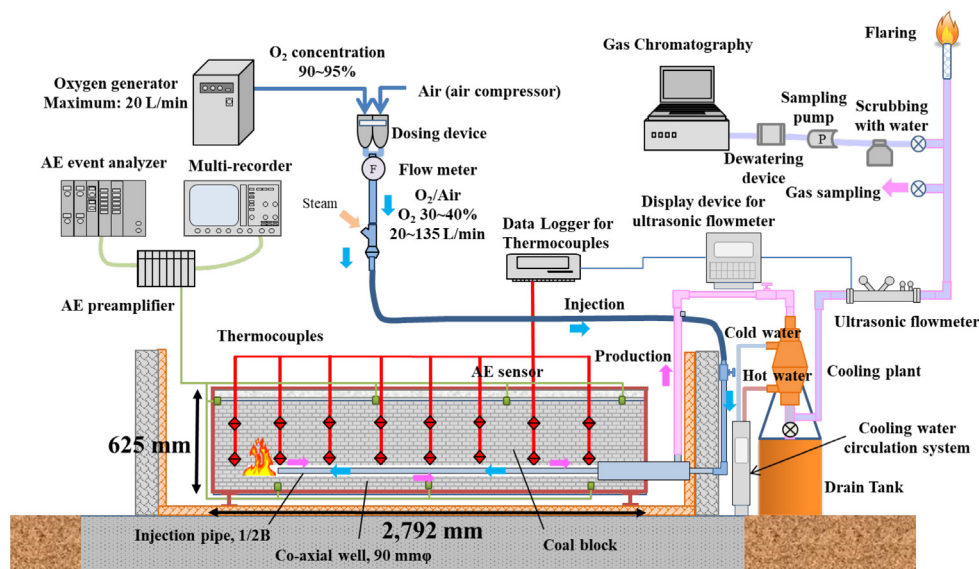
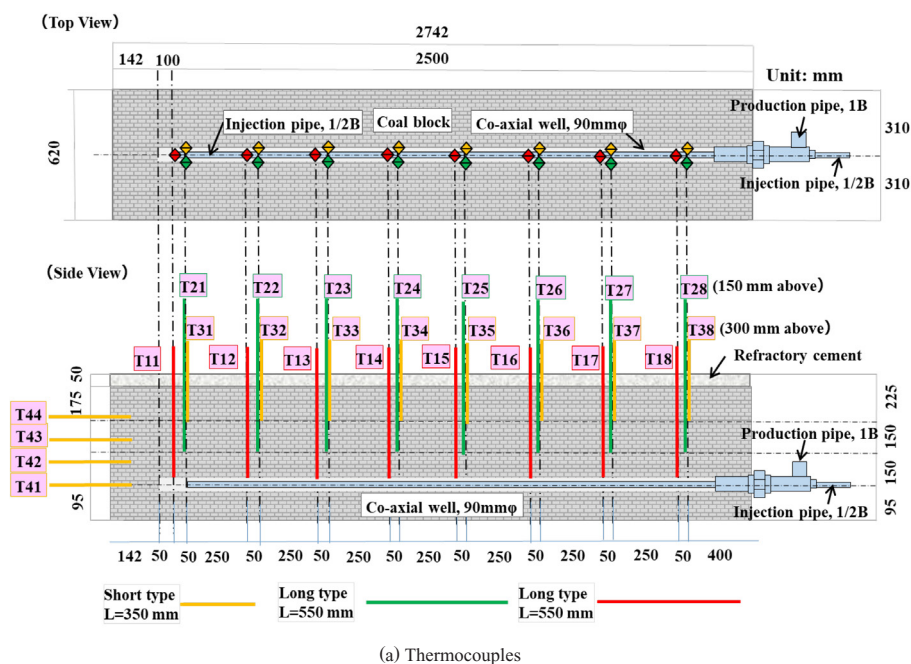
UCG中のガス化反応領域の温度は、注入剤の注入条件や石炭の質にも左右されるものの、 $1,000^\circ\text{C}$ 以上を示す。また、反応領域は、石炭の温度を増大させる酸化反応帯($>900^\circ\text{C}$)、酸素が不足する高温環境で H_2 や CO を主体とする可燃性ガスを生成する還元反応帯($600\sim900^\circ\text{C}$)、石炭の熱分解が発生する熱分解帯($300\sim600^\circ\text{C}$)に分けられ、還元反応帯や熱分解帯の反応領域が多く割合を占めていることが報告されている^{22,23)}。そのような高温のガス化領域に関して比抵抗法²⁴⁾や電気抵抗トモグラフィ²⁵⁾などの物理探査によりガス化領域の推定が試みられている。また、燃焼・ガス化により形成される炭層内の燃焼空洞の観察結果や炭層中の温度分布や熱伝導のデータを基に数値解析によって予測モデルを提案することでUCGによって形成されるガス化領域の推定や進展に関する検討も行われている^{26,27)}。UCG

Fig. 6 Outline of small-scale UCG experiment ³⁾.Fig. 7 Temperature results ³⁾.Fig. 8 Cross-section after the gasification; radial fractures were generated around the cavity (white area) ³⁾.

のモニタリングとして AE 計測を適用する場合、石炭の温度上昇により発生する微小破壊を即座に計測することが可能なため、ガス化領域のリアルタイムモニタリングが期待できる。また、熱応力による炭層内のき裂の進展により酸化表面積が増大し、燃焼ガス化が連鎖反応として進展するため、AE 計測により UCG 中の破壊活動を監視・制御することはガス化効率の向上やガス化領域を拡大させるためにも重要である。過去に実施された 1 辺 150 ~ 200 mm 程度に成形した石炭ブロックを用いた UCG の模型実験 (Fig. 6 (a), (b)) では、石炭に着火後、酸素と空気の混合気体 (酸素濃度 50 %) を連続的に注入し、石炭ブロックの燃焼とガス化を継続させることで、反応温度が 1,300 °C になることが明らかとなっており (Fig. 7)、その結果として、Fig. 8 に示すように反応領域およびその周囲に多数のき裂が生成することが確認されている ³⁾。これらのき裂は、実験後の温度低下に伴う体積収縮により生成されたものも含まれているが、石炭の加熱・ガス化中においても高温領域においてき裂が生成することが確認されている ²⁸⁾。

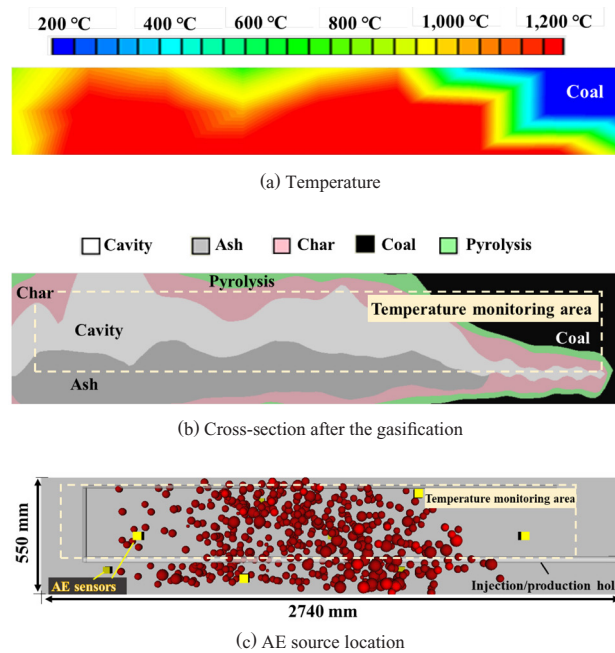
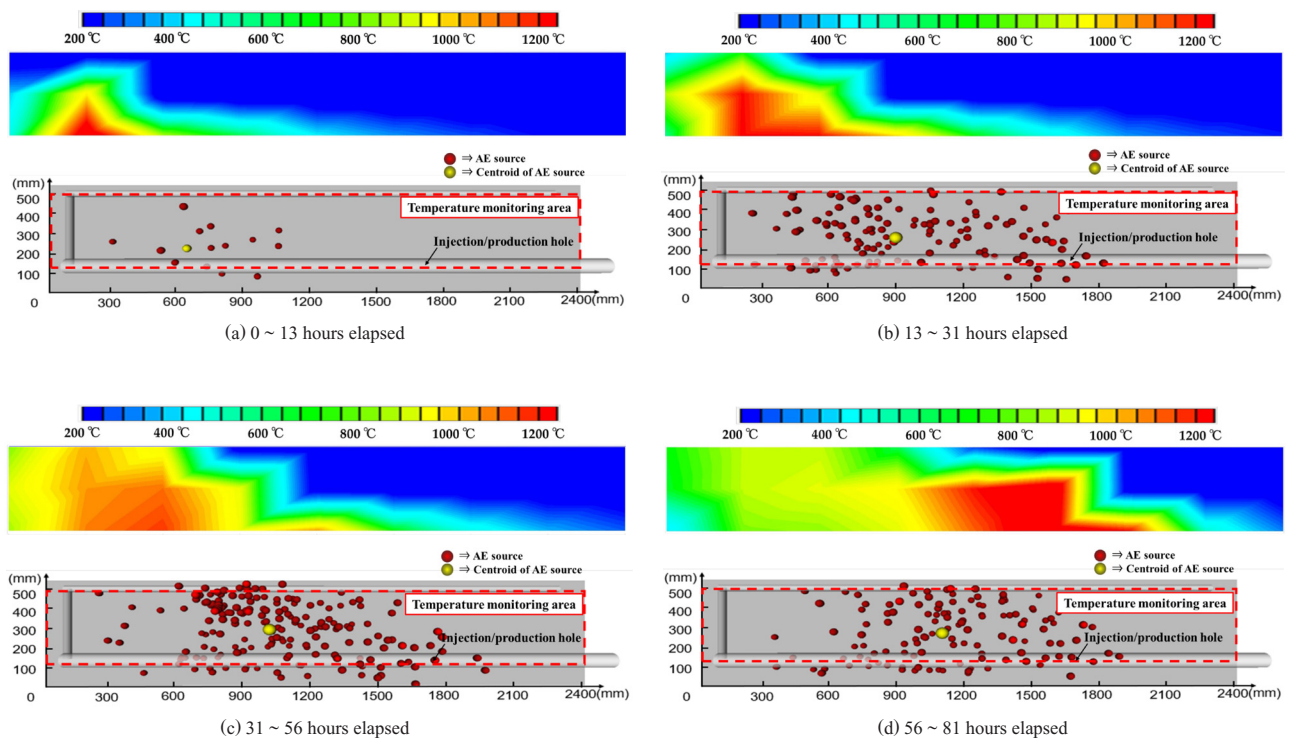
UCG 中の反応領域モニタリングへの AE 計測の適用性を確認するために、人工炭層試料を用いた UCG 模型実験を実施した

(Fig. 9) ²⁹⁾。本実験では、内寸 625 × 650 × 2,792 mm (高さ×幅×長さ) の鋼製容器の中に、破砕炭:セメント:水を 10 : 0.5 : 1 (重量比) で、モルタルミキサーにより混合した材料を流し込むことで 1.2 ton の人工炭層試料を作製した。また、熱電対、加速度トランスデューサを Fig. 10 のように配置し、実験中の温度計測と AE 計測を行った。なお、1 軸センサ (620HT; Teac Corp.) は鋼製容器側面から人工炭層試料内にウェーブガイドを挿入することで 8 個設置し、3 軸センサ (731ZT; Teac Corp.) は人工炭層試料内部に 2 つ (AE3-1, AE3-2) 設置している。本実験では、プロパンガスパバーナを用いて熱電対 T11 付近で着火後、酸素富化空気を注入することで、炭層内部の燃焼とガス化を継続させた。Fig. 11 (a) ~ (c) に示す熱電対より得られた温度結果および複数の 1 軸センサによる AE 震源標定結果より、高温領域を示した場所においてガス化に伴う空洞の形成や石炭チャーの形成が確認され、ガス化が生じた領域で多くの AE 震源が標定されている。人工炭層の端面付近では AE 震源が標定されていないが、これは 1 軸センサの設置範囲外であると推察されるため、センサの設置場所を改善することで解決できると考えられる。また、Fig. 12 (a) ~ (d) の


Fig. 9 Experimental setup of the large-scale UCG experiment ²⁹⁾.

Fig. 10 Arrangement of measurement devices ²⁹⁾.

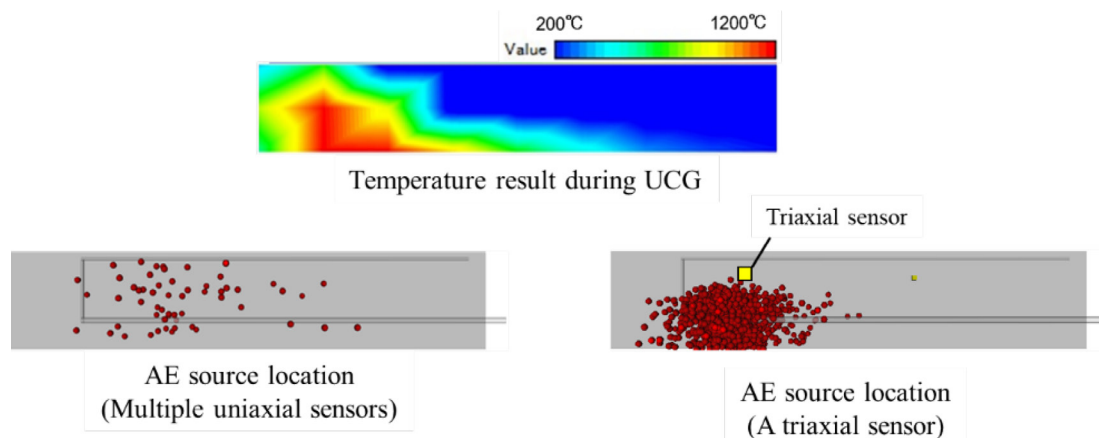
時間経過に伴う高温領域および AE 震源標定の結果に示されるように、高温領域付近に AE 震源が多く存在することのみならず、高温領域の移動に伴い、AE 震源も移動していることが認められている。すなわち、UCG 中に形成されるガス化反応領域も AE

計測により推定が可能であると考えられる。しかしながら、複数の 1 軸センサを地下に埋設することは多大な労力と費用を要するため、少数の 3 軸センサによる AE 計測でガス化領域を推定することが望ましい。Fig. 13 に示す、複数の 1 軸センサと 1 つの 3

Fig. 11 Gasification area of model UCG experiment (side view)²⁹⁾.Fig.12 Transition of temperature profile and AE source location (side view)²⁹⁾.

軸センサによる AE 震源標定結果は、前述と同様の実験における実験結果である。同図より、複数の 1 軸センサと比較して AE 震源標定が可能な範囲はセンサ周辺に限定されるものの、3 軸センサによる震源標定でも、高温領域の推定は十分可能であることが分かる。

以上より、UCG 中にガス化反応領域で発生する微小破壊も AE 計測により検知可能であり、リアルタイムで解析することで、UCG 中のガス化反応領域の制御や、過度なガス化反応領域の拡大に対するリスクマネジメントにも有用であると考えられる。

Fig. 13 AE source location with multiple uniaxial sensors and a triaxial sensor (side view)²⁹⁾.

5. UCG 中の AE 計測の課題と今後の展望

これまで述べてきた AE 計測は実験室規模スケールでの検討結果であり、実際に UCG を行う地下の条件下で、AE 計測によりガス化反応領域が推定できるかどうかは不明である。例えば、ガス化に伴う空洞の形成や内部構造の変化により、微小破壊によって生じた弾性波の伝播経路や弾性波速度が変わる。実験室規模では、そのような変化を無視しても十分にガス化反応領域を推定可能であるが、地下の複雑な地質条件下においてどの程度の影響を及ぼすのかは明らかでない。ガス化に伴う空洞の形成や炭層の内部構造の変化が甚大である場合、ガス化領域の拡大および進展を考慮した計測を行うセンサの配置を検討する必要がある。地下水が存在する場合、水の影響による波の減衰も問題となり得よう。また、UCG を適用する炭層の炭質は現場ごとに異なるため、炭質の違いが AE の発生挙動に与える影響も検討する必要がある。そして、何よりも地下の大規模な条件において、石炭の温度変化で生じる微小の破壊活動を既存のセンサで計測が可能であるのかを確認する必要がある。すなわち、UCG を行う場合に、環境計測を実施する観測孔にセンサを設置するとした場合、ガス化領域とセンサ間において AE の距離減衰が生じてしまうため、ガス化反応領域とセンサの距離がどの程度であれば AE 計測が可能であるのかを検討する必要がある。実験室規模の実験で使用している加速度トランスデューサーが現場で設置が困難である場合、代替機器としてボーリング設置型のジオフォンの使用も候補となり得るが、その場合、計測される微小破壊の周波数特性も加味した AE 計測が可能な距離の検討も必要である。また、UCG 中に地下の炭層温度を熱電対などで直接計測することは現実的でないが、既往の研究において³⁰⁾、UCG 中の AE の発生回数とガス化反応領域の温度に関係があることが報告されていることから、AE の発生挙動からガス化反応領域の温度状況を推定するといった AE 温度計というアプローチもあり得よう。

今後は、大規模な実験におけるデータの集積や地下の複雑な地質・水理状況を考慮した検討が期待される。

6. 結 言

本論説では、UCG 中のガス化反応領域のモニタリングに向けた AE 計測の適用可能性に関する見解を述べた。UCG は地下の未利用資源の有効利用方法としてポテンシャルのある技術であるが、地下の見えない場所における高温の反応プロセスとなるた

め、安全かつ低環境負荷な UCG システムの開発には、地下のモニタリング可視化技術が必要になる。石炭は加熱中に温度変化に伴う石炭の内部構造の変化や熱分解ガスの発生により微小破壊が生じ、UCG 中においても高温領域において多数のき裂が発生することが確認されており、AE 計測によるガス化反応領域の推定は可能である。しかしながら、これまで行われてきた検討は、実験室規模の限られた条件下で実施されており、実作業現場での適用にはガス化に伴う石炭の内部構造の変化、地下水の存在、炭質の違いなどが AE 震源標定に与える影響を明らかにする必要がある。さらに、地下の大規模な条件における既存機器による AE の計測可否や AE の発生挙動からガス化反応領域の温度状況を推定する検討も必要になる。

AE はき裂の発生と同時に放出されるため、リアルタイムに地下の状況を監視することができる。したがって、リアルタイムの監視と制御を行う AE 計測システムの構築が、安全で低環境負荷な UCG システムの開発に貢献すると考える。

謝辞 本論説は、JSPS 科研費 JP 19K15492, JP 20K05393, JP 21K14575 の助成を受けたものであり、北海道三笠市、株式会社砂子組砂子炭鉱、三美鉱業株式会社、幌延地圏環境研究所、九州大学エネルギー研究教育機構 (Q-PIT) のモジュール研究プログラムのご支援、ご協力を受けております。関係各位に、厚くお礼申し上げます。

References

- 1) L. H. Yang, X. Zhang, S. Q. Liu, L. Yu, and W. L. Zhang: Int. J. Hydrogen Energy. **33**(2008) 1275–1285. doi:10.1016/j.ijhydene.2007.12.055.
- 2) S. Q. Liu, Y. Y. Wang, K. Zhao, and N. Yang: Min. Sci. Technol. **19**(2009)389–394. doi:10.1016/S1674-5264(09)60073-9.
- 3) A. Hamanaka, F. Q. Su, K. Itakura, K. Takahashi, J. Kodama, and G. Deguchi: Energies **10** (2017). doi:10.3390/en10020238.
- 4) S. Shimada, H. Koide, K. Yamazaki: Journal of MMIJ. **126**(2010)602–607. doi.org/10.2473/journalofmmij.126.602.
- 5) D. M. Yang, N. Koukousas, M. Green, and Y. Sheng: J. Energy Ins. **89**(2016)469–484. doi:10.1016/j.joei.2015.05.004.
- 6) D. J. Roddy, P. L. Younger: Energy & Environmental Science (2010)400–407. doi.org/10.1039/B921197G.
- 7) A. W. Bhutto, A. A. Bazmi, G. Zahedi: Prog. Energy Combust. Sci. **39**(2013)189–214. doi:10.1016/j.pecs.2012.09.004.
- 8) F. T. Wang, S. W. Mead, D. H. Stuermer: GROUNDWATER CONTAMINATION NEAR THE HOE CREEK UCG EXPERIMENTS. (1987)619–614.
- 9) F. T. Wang, S. W. Mead, D. H. Stuermer: MECHANISMS FOR GROUNDWATER CONTAMINATION BY UCG - PRELIMINARY CONCLUSIONS FROM THE HOE CREEK STUDY. (1982)399–410.
- 10) G. Perkins: Prog. Energy Combust. Sci. **67**(2018)158–187. doi:10.1016/j.pecs.2018.02.004.

- 11) K. Ohno, Y. Shimozono, Y. Sawada, M. Ohtsu: Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection. **57**(2008)531-536. doi:10.11396/jjsndi.57.531.
- 12) 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).
- 13) C. Jiang, Y. Wang, M. Duan, X. Guo, Y. Chen, Y. Yang: Fuel. **304**(2021). doi:10.1016/j.fuel.2021.121455.
- 14) R. Naka, T. Tatekawa, J. Kodama, T. Sugawara, K. Itakura, A. Hamanaka, G. Deguchi: Prof. of 10th Asian Rock Mechanics Symposium. (2018).
- 15) H. A. Kasani, R. J. Chalaturnyk: Energies. **10**(2017). doi:10.3390/en10070854.
- 16) Z. Yangsheng, Q. Fang, W. Zhijun, Z. Yuan, L. Weiguo, M. Qiaorong: Transp. Porous Media. **82**(2010)401-412. doi:10.1007/s11242-009-9436-8.
- 17) S. Q. Liu, S. J. Zhang, F. Chen, C. H. Wang, M. Y. Liu: Energy Fuels, **28**(2014)6869-6876. doi:10.1021/ef501696e.
- 18) K. Matsudaira, M. Nishimura, S. Asada: Current Advances in Materials and Processes. **11**(1998)843.
- 19) J. Kodama, R. Naka, T. Minami, T. Sugawra, A. Hamanaka, G. Deguchi, K. Itakura, D. Fukuda, Y. Fujii: Proc. of MMIJ Fall Meeting. **6**(2019).
- 20) R. Ding, Q. Sun, S. Z. Xue, Q. M. Shi, Z. L. Ge, D. L. Li : J. Therm. Anal. Calorim. **147**(2022) 11391-11400. doi:10.1007/s10973-022-11353-0.
- 21) A. Hamanaka, K. Itakura, J. Kodama, G. Deguchi: Proc. of MMIJ Fall Meeting. **9**(2022).
- 22) Z. Q. Wang, X. Y. Xu, Y. Cui: Energy Fuels. **33**(2019)4740-4747. doi:10.1021/acs.energyfuels.9b00037.
- 23) Z. Q. Wang, J. Liang, L. X. Shi, J. F. Xi, S. Li, Y. Cui: Fuel. **190**(2017)435-443. doi:10.1016/j.fuel.2016.10.052.
- 24) S. Tatiana, G. Igor, B. Alexey: Int. J. Min. Sci. Technol. **22**(2012)351-355. doi:10.1016/j.ijmst.2012.04.012.
- 25) R. Mellors, X. Yang, J. A. White, A. Ramirez, J. Wagoner, D. W. Camp : Mitigation Adapt. Strategies Global Change. **21**(2016)487-500. doi:10.1007/s11027-014-9584-1.
- 26) G. Perkins : Prog. Energy Combust. Sci. **67**(2018)234-274. doi:10.1016/j.pecs.2018.03.002.
- 27) G. Samdani, P. Aghalayam, A. Ganesh, R. K. Sapru, B. L. Lohar, S. Mahajani: Fuel. **181**(2016) 690-703. doi:10.1016/j.fuel.2016.05.020.
- 28) T. Minami, J. Kodama, T. Sugawra, A. Hamanaka, G. Deguchi, K. Itakura, K. Takahashi, Y. Fujii, D. Fukuda: Proc. of MMIJ Fall Meeting. **7**(2020).
- 29) R. Iriguchi, Y. Ishii, A. Hamanaka, F. Q. Su, K. Itakura, J. Kodama, T. Sasaoka, H. Shimada, G. Deguchi: eng, **4**(2023)2960-2977. doi.org/10.3390/eng4040166.
- 30) F. Q. Su, A. Hamanaka, K. Itakura, W. Zhang, G. Deguchi, K. Sato, K. Takahashi, J. Kodama: Appl. Energy, **223**(2018)82-92. doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.045.