

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14575

研究課題名（和文）低品位炭の有効利用に向けた石炭地下ガス化におけるAE発生メカニズムの解明

研究課題名（英文）Mechanism of AE Generation in Underground Coal Gasification for Utilization of Low-Grade Coal

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：低品位炭におけるガス化反応中のAE発生に関して検討を行った結果、非粘結性を有する低品位炭において多くのAEが発生することが明らかとなった。それらのAEは水蒸気を含めたガス生成時に多く発生することも分かった。また、小規模UCG模型実験より、低品位炭においても高品位炭と同様にガス化反応が促進する高温領域の形成が確認された。さらに、低品位炭において多数のAEイベントとき裂生成が認められ、反応領域が拡大した。したがって、低品位炭においても高品位炭と同様にガス化に必要な高温環境を形成することができ、非粘結性によって反応領域が高品位炭と比較して拡大しやすい傾向があることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石炭を加熱した場合に発生するAEに関しては学術的文献が限られているが、本研究により石炭の温度変化に伴うAE発生には粘結性の有無やガスの発生が関係していることが明らかとなり、高温環境下での破壊メカニズムに関して新たな知見を得ることができた。また、石炭の埋蔵量の多くは褐炭や亜瀝青炭などの低品位炭に分類されるが、それらの低品位炭はUCGにおいて反応領域が広範囲に拡大するため、エネルギー回収という観点から有利に働くことが明らかとなり、未利用資源の有効活用に関する可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The results of a study on AE generation during the gasification reaction of low-grade coals in underground coal gasification revealed that a large amount of AE is generated in non-caking low-grade coals. It was also found that AE was generated more frequently during gas generation including water vapor. Small-scale UCG model experiments also confirmed the formation of a high-temperature region in low-grade coals, which promotes gasification reactions similar to those in high-grade coals. In addition, the reaction zone was expanded in the low-grade coals with numerous AE events and crack generation. Therefore, it is clear that the high-temperature area necessary for gasification can be formed in low-grade coals as well as high-grade coals. Besides, the reaction zone tends to expand more easily in low-grade coals than in high-grade coals due to their non-coking feature.

研究分野：岩盤工学、地圏開発システム工学

キーワード：石炭地下ガス化 UCG AE計測 低品位炭 水素

1. 研究開始当初の背景

石炭地下ガス化 (Underground Coal Gasification: UCG) は地下の未利用石炭資源を原位置で燃焼・ガス化する技術であり、地下のガス化反応領域のモニタリングとして破壊音 (AE: Acoustic Emission) 計測が有効であることが示されてきた。しかしながら、それらの検討のほとんどは高品位の瀝青炭を用いて実施されており、石炭の品位が変わったときにガス化時の AE の発生がどのように変化するのかといったことは明らかになっていない。また、石炭は埋蔵量が多く、世界各地に広く分布していることから安定供給性に優れているという長所を有しているものの、世界の石炭の埋蔵量のおよそ半分は経済的に価値の低い褐炭や亜瀝青炭などの低品位炭に分類されるという短所もある。しかしながら、UCG においては反応性が高く揮発分が多い非粘結炭においてガス化領域が広がりやすくガス生成量も多くなるため、ガス化に有利である。すなわち、非粘結炭の低品位炭におけるガス化反応中の AE 発生メカニズムを解明することで、これまでエネルギー資源としての利用が困難であった低品位炭に対して、UCG による有効利用の可能性を示唆することが可能になる。

2. 研究の目的

既往の研究から、燃焼・ガス化領域の可視化には AE (Acoustic Emission: 破壊音) 計測法が有効であることが明らかとなっており、AE を用いた燃焼・ガス化領域可視化が検討されているが、既往の UCG に関する加熱実験の多くが高品位炭で行われている。その一方で、UCG では粘結性が低く、反応性が高い低品位炭の方がガス化に有利とされている。すなわち、低品位炭を対象とした UCG における燃焼・ガス化領域の評価に向けた AE 計測の適用を検討するために、低品位炭からの AE の発生挙動に関して明らかにする必要がある。以上より、本研究では、石炭の品位と UCG 中に発生する AE 活動の関係性を明らかにし、主に低品位炭をガス化した場合に生じる AE 活動を評価することで、UCG において低品位炭がガス化領域の広がりを与える影響を検討する。

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 の石炭の温度状況と AE 活動の関係性を明らかにする 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 活動の検討 (図 1) では、高品位炭の瀝青炭と低品位炭の褐炭の石炭試料を 1 辺 40 mm 程度のブロック状に成形し、石英ヒーターの温度を 50 °C から 550 °C まで 5 分ごとに 50 °C ずつ段階的に加熱していく実験を実施し、AE 発生数などを計測した。また、石炭から生成するガス成分および重量変化を計測するため、プログラム管状電気炉および他机上型電気炉を用いた加熱実験も行った (図 2, 3)。

2) 小規模 UCG 模型実験 (図 4) では、高品位炭と低品位炭を用いて、200 mm×200 mm×250 mm の石炭ブロックを直径 300 mm、高さ 350 mm のペール缶内で耐熱セメントにより固定することで、UCG 模型試料を作製した。また、UCG 模型試料に熱電対および加速度計を取り付け、UCG 模型実験中の石炭の温度および AE を計測した。



図 1 石炭供試体の温度上昇による AE 計測実験



図 2 プログラム管状電気炉



図3 卓上型電気炉

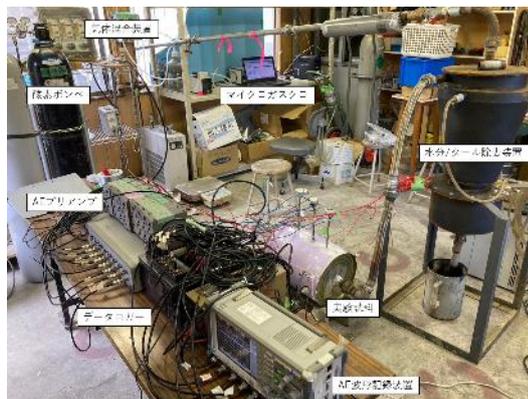
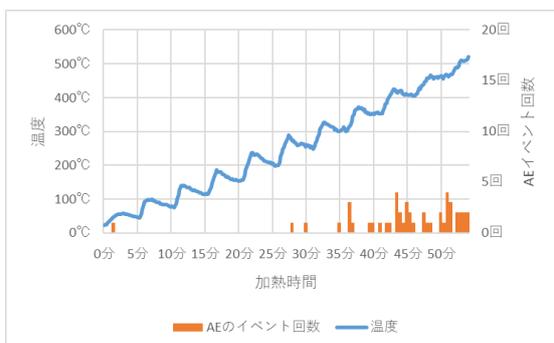


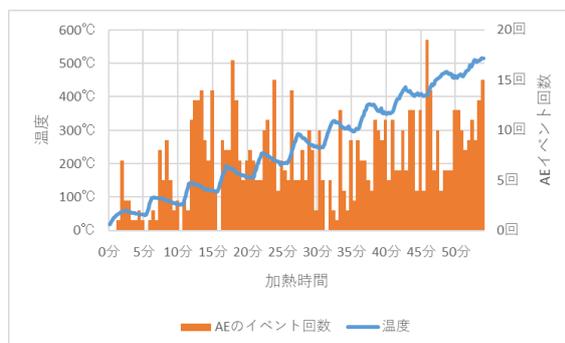
図4 小規模 UCG 模型実験

4. 研究成果

図5 (a), (b) に温度と AE イベント数の時間変化を示す。同図より、低品位炭より発生する AE イベントの方が明らかに多く計測されている。これは、低品位炭の粘結性が小さく、反応性が高いことに起因していると考えられる。高品位炭および低品位炭のどちらも 100~200 °C 付近で AE が多く計測された後、400~500 °C 付近でさらに多くの AE が計測されている傾向にある。これは 100~200 °C 付近では水分が水蒸気になることで AE が発生し、400~500 °C 付近ではガス化が進行することで AE が発生していると考えられる。



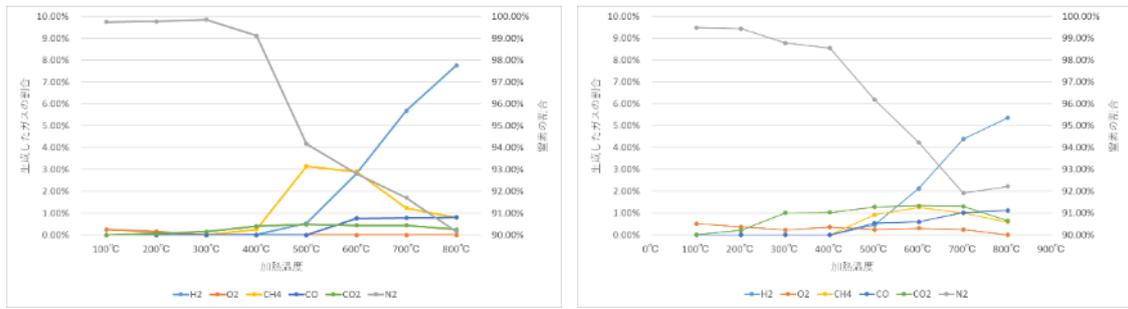
(a) 高品位炭



(b) 低品位炭

図5 温度と AE イベント数の時間変化 (550 °C まで段階的に加熱)

図6 (a), (b) に生成したガスの成分割合, 図7 (a), (b) に加熱により減少した石炭の重量変化の結果を示す。図6において低品位炭および高品位炭のどちらも 400~500 °C で生成ガス中の窒素濃度が大きく減少していることから、可燃性ガスの割合が増加していることがわかる。前節より、400~500 °C 付近で多くの AE が計測されていることを考慮すれば、同温度帯においては石炭のガス化によって AE が増加したと考えられる。また、AE の発生が認められる 100~200 °C 付近では可燃性ガスの生成割合は増加していないが、図7より石炭の重量が減少していることを考慮すれば、水蒸気などの生成ガスの発生によって AE が増加したと考えられる。両石炭の違いとして、高品位炭においては 450 °C 以上で可燃性ガスの生成量増加や重量の減少が顕著に認められるが、低品位炭においては比較的低温においても可燃性ガスの生成量増加や重量の減少が認められる。すなわち、低品位炭においては、粘結性が小さいことに加えて石炭に多く含有されている水分の蒸発による水蒸気の発生や低温における生成ガスの発生により、AE の発生数が増加したと考えられる。



(a) 高品位炭

(b) 低品位炭

図 6 生成したガスの成分割合

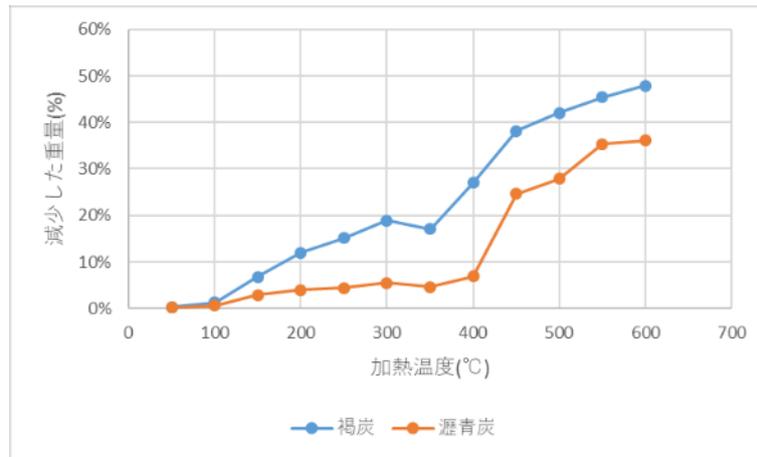


図 7 加熱によって減少した石炭の重量

図 8 に高品位炭と低品位炭における石炭試料内部の温度分布を示す。同図より、低品位炭においても高品位炭と同様に試料内でガス化反応が促進する 550 °C以上の高温領域の形成が確認された。さらに、着火確認から 30 分経過時の高品位炭における高温領域の拡大は緩やかであることに對して、低品位炭においては 550 °C以上の高温領域が大きく拡大することが認められる。図 9 (a), (b) にそれぞれ高品位炭と低品位炭における AE イベント数と生成ガス流量の経時変化を示す。同図より実験開始 30 分経過時点において、高品位炭と比較して低品位炭の AE イベント数が 40~60 個多く計測されており、生成ガス流量は 2 倍程度であることが分かる。これらの結果は低品位炭の非粘結性によって実験の初期段階でより多数のき裂が発生し、反応領域が拡大したことに起因すると考えられる。図 10 (a), (b) にそれぞれ高品位炭と低品位炭における実験後の石炭試料の断面図を示す。石炭試料断面の白色部は実験終了後に石炭試料内に石膏を流し込んで固めた箇所であり、燃焼・ガス化された領域である。高品位炭と比較して、低品位炭ではガス化領域がより拡大していることが認められる。さらに、非粘結性である低品位炭において、破線で囲んだ反応領域の最も外側の領域に大きなき裂が認められ、反応領域が拡大したことが考えられる。一方、高品位炭においては、破線部分に石炭が軟化溶融した形跡が確認され、石炭の軟化溶融により反応領域の拡大が制限されたと考えられる。したがって、低品位炭においても高品位炭と同様にガス化に必要な高温環境を形成することができ、非粘結性によって反応領域が高品位炭と比較して拡大しやすい傾向があることが明らかになった。

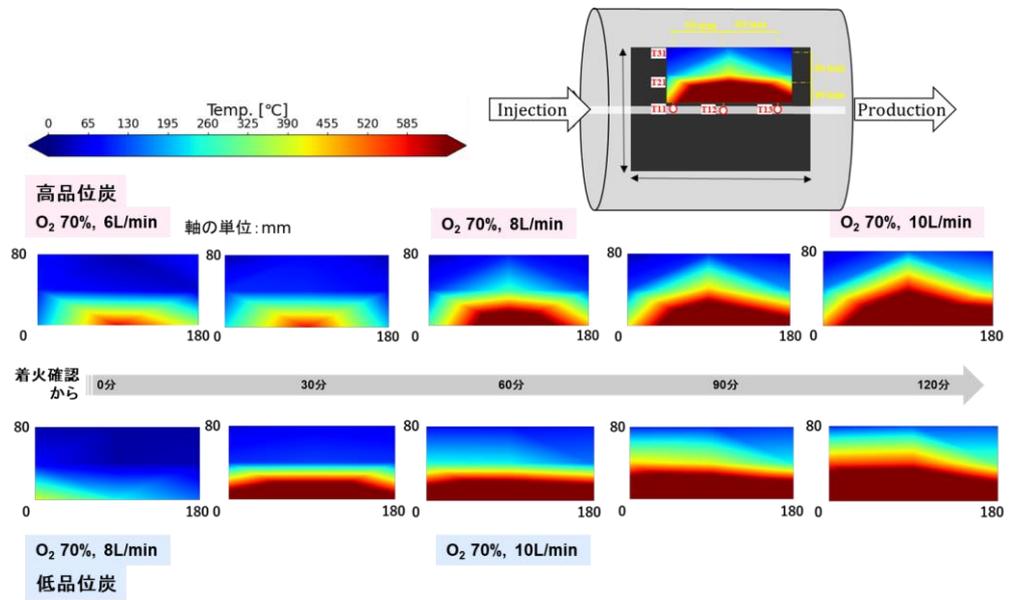


図8 石炭試料内部の温度分布

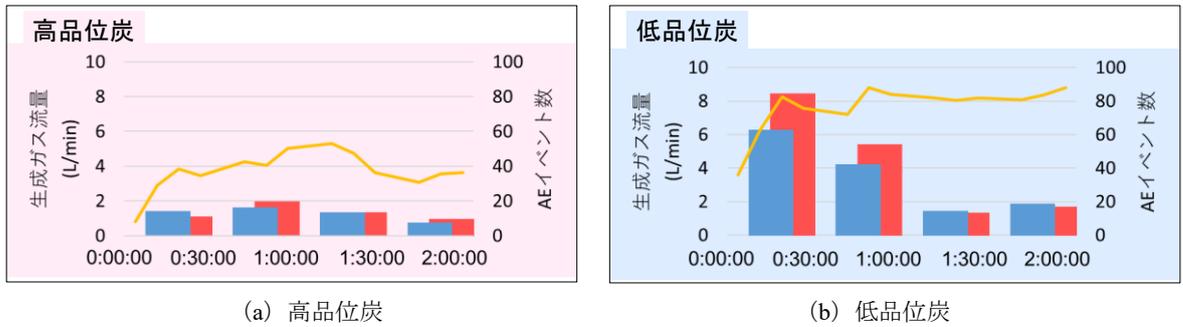


図9 AE イベント数と生成ガス流量の経時変化

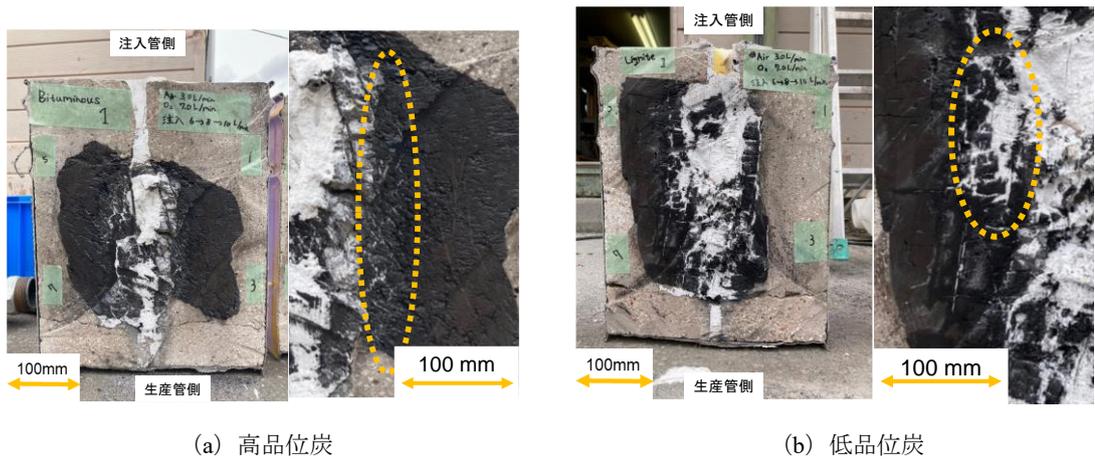


図10 実験終了後の石炭試料の断面図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Su Fa-qiang, Zhang Tao, Wu Jun-bo, Deng Qi-chao, Hamanaka Akihiro, Yu Yi-he, Dai Meng-jia, He Xiao-long, Yang Jun-nan	4. 巻 329
2. 論文標題 Energy recovery evaluation and temperature field research of underground coal gasification under different oxygen concentrations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 125389 ~ 125389
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2022.125389	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
1. 著者名 Su Fa-qiang, Wu Jun-bo, Tao-Zhang, Deng Qi-chao, Yu Yi-he, Hamanaka Akihiro, Dai Meng-Jia, Yang Jun-Nan, He Xiao-long	4. 巻 263
2. 論文標題 Study on the monitoring method of cavity growth in underground coal gasification under laboratory conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 126048 ~ 126048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2022.126048	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
1. 著者名 Hamanaka Akihiro, Su Fa-qiang, Itakura Ken-ichi, Takahashi Kazuhiro, Kodama Jun-ichi, Deguchi Gota	4. 巻 305
2. 論文標題 Experimental study on evaluation of underground coal gasification with a horizontal hole using two different coals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fuel	6. 最初と最後の頁 121556 ~ 121556
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fuel.2021.121556	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
1. 著者名 Hamanaka Akihiro, Ishii Yuma, Itakura Ken-ichi, Sasaoka Takashi, Shimada Hideki, Widodo Nuhindro Priagung, Sulistianto Budi, Kodama Jun-ichi, Deguchi Gota	4. 巻 13
2. 論文標題 Monitoring the gasification area and its behavior in underground coal gasification by acoustic emission technique instead of temperature measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-023-36937-0	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Iriguchi Rika, Ishii Yuma, Hamanaka Akihiro, Su Faqiang, Itakura Ken-ichi, Kodama Jun-ichi, Sasaoka Takashi, Shimada Hideki, Deguchi Gota	4. 巻 4
2. 論文標題 Visualization of Movement and Expansion of Coal Reaction Zone by Acoustic Emission Monitoring in Underground Coal Gasification System	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Eng	6. 最初と最後の頁 2960 ~ 2977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/eng4040166	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 石井悠真, 安藤勇大, 濱中晃弘, 板倉賢一, 笹岡孝司, 島田英樹, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭加熱実験による石炭の品位がAEの発生に与える影響
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 濱中晃弘, 板倉賢一, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化 (UCG) における炭層の破壊メカニズムと反応領域のモニタリング
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuma ISHII, Akihiro HAMANAKA, Ken-ichi ITAKURA, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Jun-ichi KODAMA, Gota DEGUCHI
2. 発表標題 Study on AE Generation from Subbituminous Coal and Lignite in Coal Heating Experiments
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井悠真, 瀧中晃弘, 板倉賢一, 島田英樹, 児玉淳一, 出口剛太, 笹岡孝司
2. 発表標題 石炭加熱実験による石炭の品位がAE及びびガスの発生に与える影響
3. 学会等名 資源・素材学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧中晃弘, 板倉賢一, 蘇発強, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 最近の石炭地下ガス化(UCG)模擬実験の取り組みと水素生成に関する考察
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤勇大, 瀧中晃弘, 板倉賢一, 笹岡孝司, 島田英樹, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化(UCG)システムにおける反応領域の推定に向けたAE計測の適用性
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田雅裕, 児玉淳一, 出口剛太, 瀧中晃弘, 板倉賢一, 高橋一弘, 福田大祐, 藤井義明
2. 発表標題 三笠市での水素利用型UCGに関するプレF/S
3. 学会等名 資源・素材関係学協会合同秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀨中晃弘, 板倉賢一, 蘇我強, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 石炭地下ガス化 (UCG) 模擬実験によるガス化制御に関するこれまでの知見
3. 学会等名 資源・素材学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤勇大, 瀨中晃弘, 板倉賢一, 蘇我強, 高橋一弘, 児玉淳一, 出口剛太
2. 発表標題 大規模UCG模型実験における反応領域の推定に向けたAE計測の適用性
3. 学会等名 資源・素材学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihiro HAMANAKA, Yoshimitsu MAKABE, Ken-ichi ITAKURA, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Nuhindro Priagung WIDODO, Budi SULISTIANTO, Gota DEGUCHI
2. 発表標題 Study on Generating Acoustic Emission with Heating Coal for Application as Monitoring System for Underground Coal Gasification
3. 学会等名 The 11th Asian Rock Mechanics Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki ANDO, Akihiro HAMANAKA, Ken-ichi ITAKURA, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Jun-ichi KODAMA, Gota DEGUCHI
2. 発表標題 Applicability of AE Monitoring for Estimating Gasification Zone in Underground Coal Gasification (UCG)
3. 学会等名 International Symposium on Earth Science and Technology 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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	板倉 賢一 (Itakura Ken-ichi) (20168298)	室蘭工業大学	
研究協力者	出口 剛太 (Deguchi Gota)	地下資源イノベーションネットワーク	
研究協力者	スウ ファーチアン (Su Fa-qiang)	河南工科大学	
研究協力者	ウィドード ヌヒンドロ プリアグ ン (Widodo Nuhindro Priagung)	バンドン工科大学	
研究協力者	スリスティアーノ ブディ (Sulistianto Budi)	バンドン工科大学	

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
---------	---------