



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 資源・素材学会 公開日: 2020-01-22 キーワード (Ja): 石炭地下ガス化, 水平同軸, 破壊音 キーワード (En): Underground coal gasification, Horizontal co-axial, Acoustic emission 作成者: 濱中, 晃弘, 板倉, 賢一, 蘇, 発強, 高橋, 一弘, 佐藤, 孝紀, 児玉, 淳一, 出口, 剛太 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010104

企画講演

最近の石炭等エネルギーの開発・利用の動向

2019年9月25日(水) 09:30 ~ 12:00 第2会場 (C1 1階 講義室2(173))

[2K0201-07-04] 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**Large-scale Laboratory Experiment on Evaluation of Underground Coal Gasification with a Horizontal Well in terms of Coal Quality and Injection Condition**

○濱中 晃弘¹、板倉 賢一²、蘇 尧強³、高橋 一弘²、佐藤 孝紀²、児玉 淳一⁴、出口 剛太⁵ (1.九州大学、2.室蘭工業大学、3.河南理工大学、4.北海道大学、5.地下資源イノベーションネットワーク)

○Akihiro Hamanaka¹, Ken-ichi Itakura², Faqiang Su³, Kazuhiro Takahashi², Kohki Satoh², Jun-ichi Kodama⁴, Gota Deguchi⁵ (1. Kyushu University, 2. Muroran Institute of Technology, 3. Henan Polytechnic University, 4. Hokkaido University, 5. Underground Resources Innovation Network)

キーワード：石炭地下ガス化、水平同軸、破壊音

Underground coal gasification, Horizontal co-axial, Acoustic emission

石炭地下ガス化 (Underground Coal Gasification: UCG) は、石炭層に注入孔および生産孔のボーリングを穿ち、地下の石炭層を原位置で燃焼・ガス化させることで、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り、これまで経済的・技術的な観点から回収のできなかつた未利用石炭資源の有効利用技術である。本講演では、石炭ブロック (0.5 m × 0.5 m × 2.5 m) を用いたUCG模型実験の実施し、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に関して検討した結果について述べる。

1. はじめに

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転用したものであり、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内温度を高め、化学反応を促進させることにより、地表で生成ガスの熱エネルギーや一酸化炭素、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。これまで検討を行ってきた同軸方式UCGシステム(1本のボーリング孔のみによりガス化剤の注入および生成ガスの回収を実施)は、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が、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^{1,2)}。また、生成される可燃性ガス成分やガス化反応領域の範囲は炭質や注入条件に影響されると考えられる。上述の背景より、本報告では、石炭ブロックおよび破碎炭を組み合わせることで模擬石炭層(550 mm × 600 mm × 2,740 mm)を作製し、水平孔を用いた同軸方式 UCG システムによる UCG 模型実験の実施することで、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に関して検討した結果について述べる。

2. UCG 模型実験

図1に石炭ブロックを用いた UCG 模型実験の概念図を示す。本実験では、鋼製容器の底面から 125 mm の位置に 2,600 mm の深さまで穿孔した直径 45 mm の水平孔を実験に供した。注入管には 1/2 インチ管を用い、注入管の内側から注入ガスを供給し、注入管の外側と孔壁の間から生成ガスを回収した。また、炭質が生成ガス成分および反応領域に与える影響に関して検討するため、表1に示すように、発熱量、灰分、炭素含有量が大きく異なる2種類の石炭を用いて実験を行った。

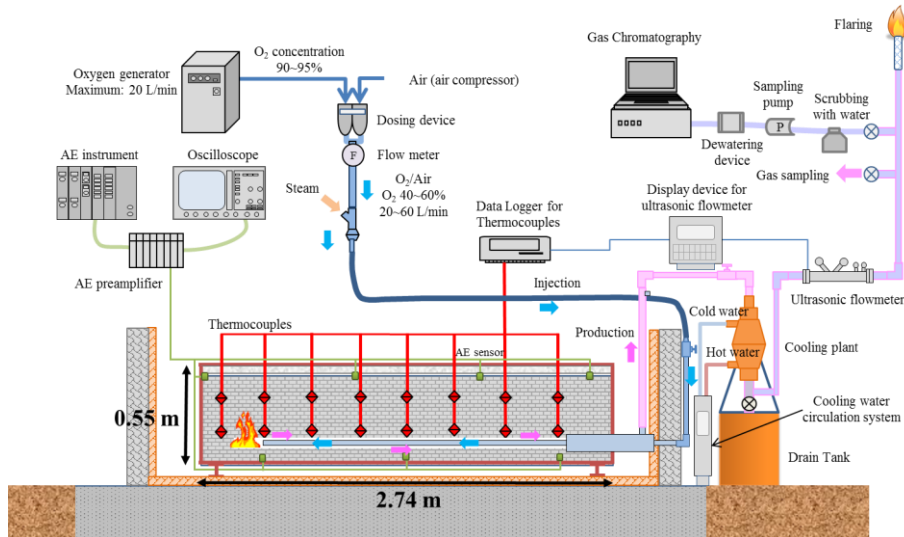


図1 UCG 模型実験概念図

表1 石炭試料の工業分析値および元素分析値

	Calorific value (MJ/kg)	Proximate analysis (wt%)				Ultimate analysis (wt%)				
		Moisture	Ash	Volatiles	Fixed carbon	C	H	N	S	O
Experiment 1	30.18	2.9	7.9	42.2	47.0	73.2	5.46	1.64	0.95	10.64
Experiment 2	22.66	2.2	28.8	34.0	35.0	55.3	4.20	1.28	0.76	9.31

実験は、最初に水平孔の孔底に市販のボンベタイプのガスバーナーを用いて着火し、着火確認後、酸素富化空気(酸素濃度は 50%で一定)を大気圧と同程度の注入圧で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。実験が進むにつれ、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ため、安定したガス化に必要な酸化剤を供給するために図2 (a), (b)に示すように注入量を段階的に増大させた(Stage I ~ IV)。なお、同実験時刻における注入流量は、実験 2 の方が実験 1 と比較して 10 L/min 大きい。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、圧電型加速度トランスデューサ(620HT; Teac Corp.)を用いて AE 波を検出し、アンプ(SA-611; Teac Corp.)によって増幅の後、マルチレコーダ(GR-7000; Keyence Corp.)で継続的に AE 波形を計測した。図3 (a), (b)に熱電対および圧電型加速度トランスデューサの配置を示す。UCG プロセス中の生成ガスは、ガスに含まれる水分やタール分を除去した後、1 時間毎にマイクロガスクロ(INFICTION Micro GC 3000A)により、酸素(O₂)、窒素(N₂)、二酸化炭素(CO₂)、水素(H₂)、一酸化炭素(CO)、メタン(CH₄)、エチレン(C₂H₄)、エタン(C₂H₆)、プロピレン(C₃H₆)、プロパン(C₃H₈)の濃度を計測した。また、注入管の先端は孔底から 200 mm の位置で実験を開始したが、ガス化領域を未反応の石

炭部分に移動させるため、注入菅の先端をおよそ5時間ごとに100 mmずつ同軸菅側に順次移動させた。本実験でのガス化実験継続時間は実験1で95時間、実験2で27時間であった。実験終了時には、消火のため二酸化炭素をガス化領域に注入した。

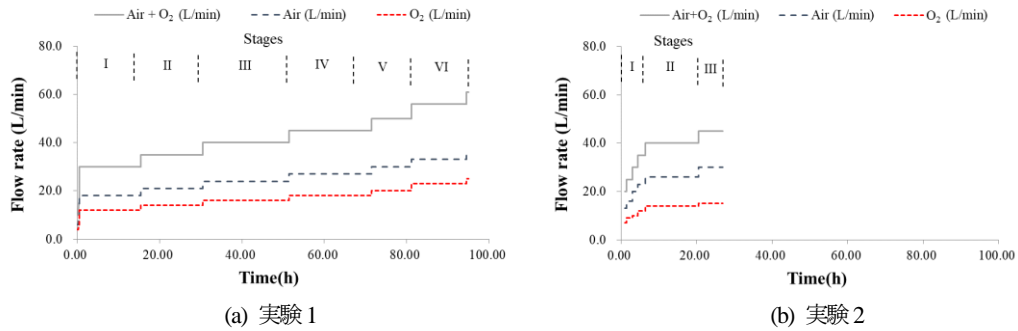


図2 UCG 模型実験中の注入条件

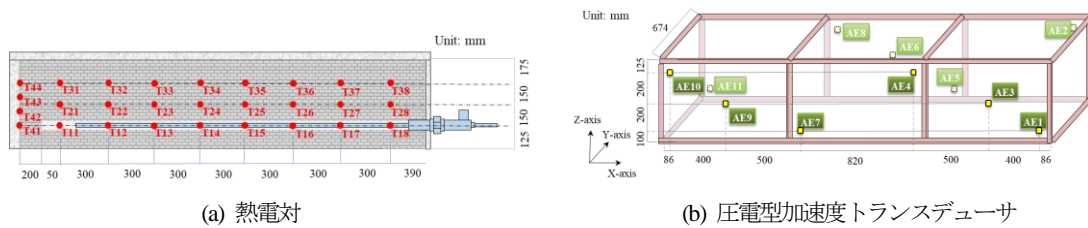


図3 計測センサーの配置

3. 結果および考察

3-1 温度分布およびAE計測による震源標定

熱電対より得られた温度結果を基に作成した温度分布の結果を図4 (a), (b)に示す。同図より、注入菅の位置の移動に伴い、高温領域も移動していることが分かる。これは、ガス化領域が酸化剤の注入位置周辺で活発になることを示しており、注入菅の位置を移動させることでガス化領域も移動させることが可能であると考えられる。すなわち、注入菅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考えられる。また、実験1では模擬石炭層の上部まで温度が増大していることに対し、実験2では高温領域が模擬石炭層の中部までは広がっているものの、上部では温度が増大していないことが分かる。どちらの実験においても、注入圧が大気圧と同程度であり、酸素濃度がほぼ一定であることを考慮すれば、これらの差異は炭質および注入流量の差異によるものであると推察される。すなわち、実験2では石炭の灰分が多く石炭の反応性が小さいことに加えて、十分にガス化領域が拡大する以前に注入流量を増大したためガスの流速が増大し、上部へのガス化領域の拡大ではなく、同軸孔の壁面に沿って石炭の燃焼が進展したと考えられる。ここで、図5 (a), (b)にT12, T14, T16の温度規計測結果を示し、表2に図5より算出された水平方向のガス化領域の移動速度の結果を示す。水平方向のガス化領域の移動速度は、各熱電対間の距離と最高温度が計測された時間の関係から算出している。同表より、実験2では水平方向へのガス化領域の進展が実験1と比較して3倍程度速かったことが分かる。なお、UCG 模型実験中に計測された最高温度は実験1では1,300℃、実験2では1,250℃であり、ほぼ同等であった。

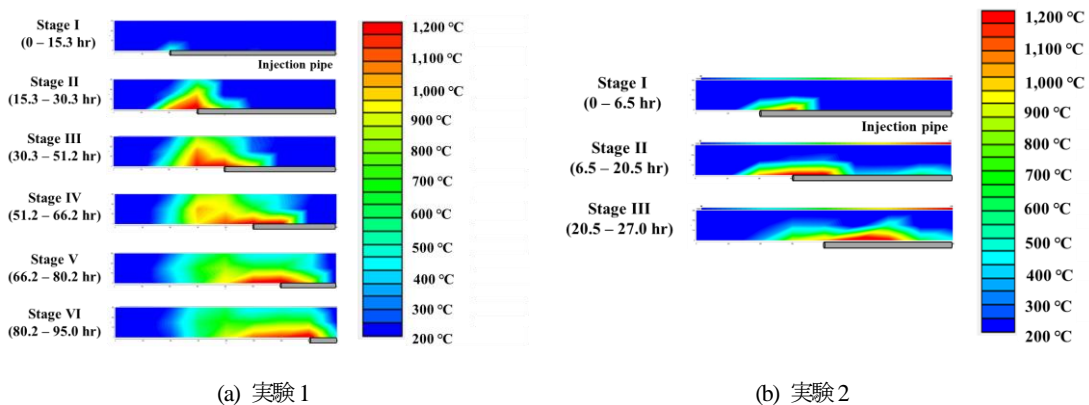


図4 炭層内最高温度分布結果

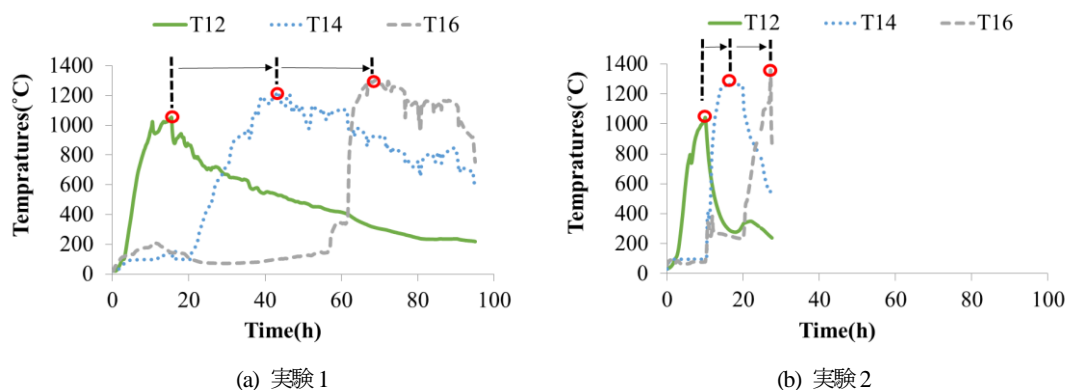


図5 炭層内温度計測結果(T12, T14, T16)

表2 水平方向のガス化領域の移動速度

	Velocity to move gasification area (mm/h)		
	T12 ~ T14	T14 ~ T16	Average
Experiment 1	21.69	23.38	22.53
Experiment 2	81.82	62.07	71.94

次に、図6(a), (b) にAE震源標定結果と炭層内最高温度分布を示す。同図の結果は、反復最小二乗法により、震源座標の最確値を算出した^{3,4)}。なお、実験2のStage Iにおいて、震源標定されたAE震源の数が少ないが、これは計測機器の不備により、一部の試験期間のデータが計測されなかったためである。同図より、高温領域の移動に伴いAE震源の位置も移動しており、ガス化領域の移動をAE計測により推定されていることが分かる。本結果を用いて、AE震源の重心を算出し、その水平方向の移動速度の平均を算出したところ、表3に示す結果となった。これは前述の水平方向のガス化領域の移動速度の結果と比較すると、実験2においてAE震源の重心移動速度が小さいものの、AE震源標定結果においても実験2のガス化領域の移動速度が実験1と比較して3倍程度速いことを示しており、実験2の方が水平方向のガス化領域の進展が速かったことを支持している。

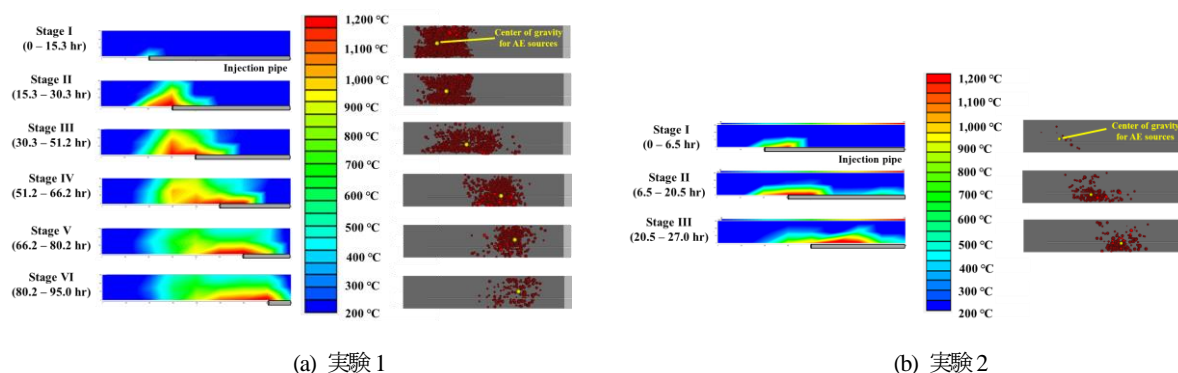


図6 AE震源標定結果と炭層内最高温度分布

表3 AE震源標定の重心の水平方向の移動速度

	Velocity to move the center of gravity for AE sources (mm/h)					
	Stage I ~ II	Stage II ~ III	Stage III ~ IV	Stage IV ~ V	Stage V ~ VI	Average
Experiment 1	10.00	19.52	32.23	16.44	4.59	16.55
Experiment 2	55.49	47.14	-	-	-	51.31

3・2 生成ガス発熱量

図7 (a), (b)に実験開始から終了までの生成ガスの主要成分および発熱量の変化を示す。生成ガスの発熱量は、各実験での生成ガスのH₂, CO, CH₄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⁹⁾。同図より、注入管の位置を移動した直後にH₂, CO, CH₄などの可燃性ガスが急激に増大している傾向にある。表4に本実験で得られた生成ガス成分および発熱量の平均値を示す。同表より、UCGで回収される主要な可燃性ガス成分の平均値は実験1においてH₂が17.06%, COが17.24%, CH₄が6.59%, 生成ガスの平均発熱量は8.05 MJ/Nm³であることに対し、実験2では、H₂が17.58%, COが19.92%, CH₄が3.75%, 生成ガスの平均発熱量は6.91 MJ/Nm³であり、実験2で回収された生成ガスの発熱量が小さいことが分かる。ここで、表5に示すように単位重量石炭の発熱量とUCGでの反応石炭単位重量あたりの生成ガスの発熱量の比である石炭のガス化効率を算出したところ、実験1で65.15%, 実験2で61.84%であり、どちらの実験においてもガス化効率に大きな差はないことから、それぞれの実験で得られた生成ガスの発熱量の違いは石炭の発熱量の違いによって生じたものであると考えられる。今回の実験はどちらも大気圧条件下で実施し、前述の温度結果より、UCGモデル実験中に計測された最高温度がどちらの実験においてもほぼ同等であったことを考慮すれば、UCG中の反応圧力および温度が同程度であれば、炭質の違いはガス化効率に影響を与えないと考えられる。

また、表6に各実験における注入流量別の生成ガス成分および発熱量の平均値を示す。同表より、実験1, 2のどちらにおいても注入流量が増大するに伴い、生成ガスの発熱量が徐々に増大していることがわかる。これは、既往の報告⁹⁾より、酸化剤の注入流量の増大に伴い、ガス化領域を促進する高温の反応領域が拡大したためと考えられる。すなわち、UCG中における注入流量を制御することにより生成ガスの発熱量をある程度制御することが可能であると考えられる。

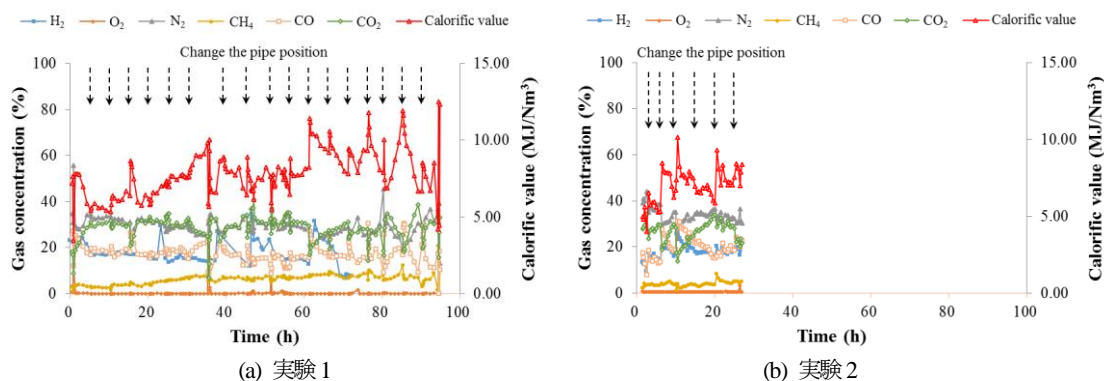


図7 生成ガスの主要成分および発熱量の変化

表4 生成ガス成分および発熱量の平均値

	Calorific value (MJ/Nm ³)	H ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)
Experiment 1	8.05	17.06	17.24	6.59	28.88	0.47	0.61	0.20	0.17
Experiment 2	6.91	17.58	19.92	3.75	25.22	0.36	0.32	0.12	0.09

表5 各実験におけるガス化効率の算出

	Recovered Energy (MJ)	Product gas volume (Nm ³)	Gasified coal (kg)	Gasification efficiency (%)
Experiment 1	3514.79	436.42	178.77	65.15
Experiment 2	723.65	104.76	51.65	61.84

表6 注入流量別の生成ガス成分および発熱量の平均値

	Flow rate (L/min)	Calorific value (MJ/Nm ³)	H ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)
Experiment 1	10~30	6.21	16.35	19.21	3.17	28.34	0.25	0.21	0.07	0.06
	35	7.00	15.11	18.16	5.07	30.64	0.27	0.47	0.14	0.14
	40	8.08	16.29	17.29	6.87	29.30	0.37	0.67	0.20	0.19
	45	8.54	18.11	16.44	7.40	28.73	0.47	0.71	0.22	0.20
	50	8.90	18.65	16.22	7.81	26.01	0.60	0.76	0.25	0.21
	56~61	8.52	17.24	17.21	7.24	29.42	0.71	0.61	0.23	0.17
Experiment 2	20~35	5.46	14.73	14.73	3.10	28.21	0.33	0.20	0.09	0.06
	40	7.00	18.38	21.90	3.32	24.02	0.33	0.27	0.10	0.07
	45	7.39	17.44	18.76	4.79	25.99	0.44	0.46	0.16	0.13

4. おわりに

本研究では、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に関して検討するために、水平孔を用いた UCG 模型実験を行った。その結果、灰分を多く含有する石炭をガス化する場合に注入流量を増大させると、ガス化領域の拡大が石炭の上部ではなく、同軸孔の壁面に沿って進展することが明らかとなった。これは、ガス化の反応領域を制限することにつながるため、石炭の品質によってガス化領域を拡大させるような適切な注入条件を設定する必要があることを示している。また、石炭の発熱量の違いにより UCG で回収される生成ガスの発熱量は変わるものの、反応圧力および温度が同程度であれば、炭質の違いはガス化効率に影響を与えないことも示され、注入流量の増大により生成ガスの発熱量が増大することも示された。効率的な UCG システムを開発するにあたり、広範囲のガス化領域の拡大および高品質な生成ガスの回収は重要な役割を担っているため、両者を満足するような適切な注入条件を今後検討していく予定である。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 JP 19K15492 の助成を受けたものであり、北海道三笠市、室蘭工業大学環境科学・防災研究センター、株式会社砂子組砂子炭鉱および石炭地下ガス化研究会(JUCG)の支援、協力を受けております。関係各位に、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) F. Q. Su, A. Hamanaka, K. Itakura, G. Deguchi, K. Satoh, J. Kodama: Evaluation of Coal Combustion Zone and Gas Energy Recovery for Underground Coal Gasification (UCG) Process, *Energy & Fuel*. **31**(2017), pp. 154–169.
- 2) A. Hamanaka, F. Q. Su, Itakura, K. K. Takahashi, J. Kodama, G. Deguchi: Effect of Injection Flow Rate on Product Gas Quality in Underground Coal Gasification (UCG) Based on Laboratory Scale Experiment: Development of Co-Axial UCG System, *Modern Environmental Science and Engineering* **2**(2016), pp. 599-605.
- 3) M. Honma, N. Kasugaya: *Jigen Kaiseki Saisyō Jijōho to Jikken shiki*, (Korona sya, Tokyo, 1986).
- 4) 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).*
- 5) F. Q. Su, K. Itakura, G. Deguchi, K. Ohga, and M. Kaiho: Evaluation of Structural Changes in the Coal Specimen Heating Process and UCG Model Experiments for Developing Efficient UCG Systems, *Journal of MMIJ*. **131**(2015), pp. 203–218.
- 6) A. Hamanaka, F. Q. Su, Itakura, K. K. Takahashi, J. Kodama, G. Deguchi: Effect of Injection Flow Rate on Product Gas Quality in Underground Coal Gasification (UCG) Based on Laboratory Scale Experiment: Development of Co-Axial UCG System, *Energies* **10**(2017) , 238; doi:10.3390/en10020238.