



Title	加熱、冷却による石炭試料の亀裂の発生と成長の観察
Author(s)	南, 貴之; 児玉, 淳一; 菅原, 隆之 他
Description	2020年度資源・素材関係学協会合同秋季大会（仙台）. 2020年9月8日～10日. オンライン開催, 宮城県.
Citation	資源・素材学会秋季大会講演集, 7(2), 1K0201-06-04
Issue Date	2020-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79282
Type	conference paper
File Information	05_Minami2020.pdf



一般講演

開発機械／岩盤工学／資源経済と社会システム／資源開発技術

2020年9月8日(火) 09:00 ～ 11:30 第2会場

[1K0201-06-04] 加熱、冷却による石炭試料の亀裂の発生と成長の観察**Observation of crack initiation and growth in coal specimen during heating and cooling processes**

○南 貴之¹、児玉 淳一¹、菅原 隆之¹、濱中 晃弘⁴、出口 剛太³、板倉 健一²、高橋 一弘²、藤井 義明¹、福田 大祐¹
(1. 北海道大学、2. 室蘭工業大学、3. 地下資源イノベーションネットワーク、4. 九州大学)

○Takayuki Minami¹, Junichi Kodama¹, Takayuki Sugawara¹, Akihiro Hamanaka⁴, Gota Deguchi³, Kenichi Itakura², Kazuhiro Takahashi², Yoshiaki Fujii¹, Daisuke Fukuda¹ (1. Hokkaido University, 2. Muroran Institute of Technology, 3. Underground Resources Innovation Network, 4. Kyushu University)

キーワード：石炭、亀裂、加熱、冷却

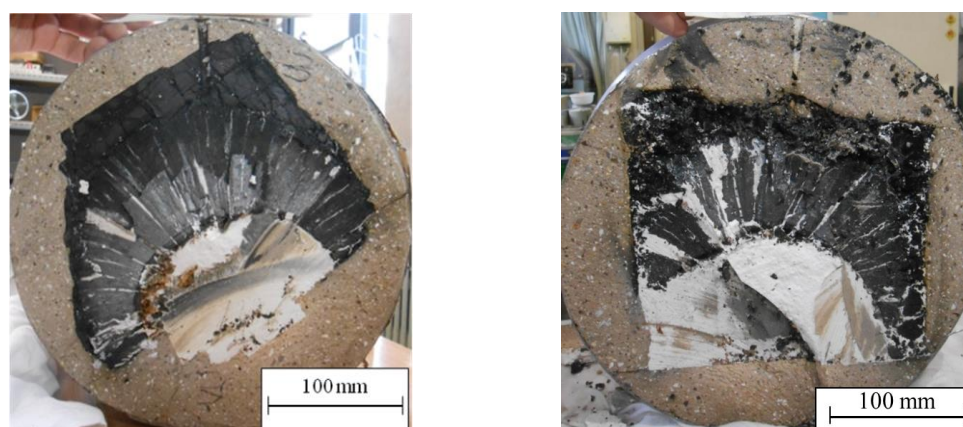
Coal, Crack, Heating, Cooling

石炭の燃焼、ガス化によりUCGでは石炭層に亀裂が発生する可能性があるため、その発生と成長のメカニズムの解明は、地表の安定性評価と環境リスクの評価に非常に重要な役割を持っている。筆者らは、塊炭と粉炭を用いて小規模なUCG模型実験を実施した結果、塊炭とで作製した人工炭層に加え、粉炭で作製した人工炭素にも燃焼空洞の周辺に放射状の亀裂が発生していることが明らかとなった。そして、500℃以上の温度の下で起こる石炭の熱収縮により燃焼空洞の周囲に引張応力が発生し、この引張応力が上記の放射状き裂を発生させた可能性があることを指摘した。本研究では、放射状き裂の発生と成長のプロセスの詳細を明らかにするために、加熱中および冷却中の塊炭試料と粉炭試料をカメラで撮影、観察した。そして、石炭の収縮変形や、亀裂の発生、伸長と温度との相関性を見出した。今後はDICにより加熱した際の石炭表面のひずみを測定し、塊炭の線膨張係数を算出するとともに、熱応力解析を行い、放射状亀裂発生メカニズムを考察する予定である。

1. はじめに

筆者らが実施した UCG 大型模型実験では、長さ約 350cm の石炭ブロックを炭層から切り出すのは困難であったため、破碎炭を圧密することにより人工的に長さ約 350cm の炭層を作製した¹⁾。この人工炭層は天然の炭層とは構造が異なるため、実験結果を正しく評価するには、圧密した破碎炭と塊炭の燃焼・ガス化特性の類似点と相違点を明確にする必要があった。そのため、筆者らは、塊炭と粉炭を用いて小規模な UCG 模型実験を実施した²⁾。その結果、塊炭と粉炭で作製した人工炭層には燃焼空洞の周辺に放射状の亀裂が発生していることが明らかとなった³⁾ (図 1)。さらに、2 次元熱応力解析を実施し、小規模 UCG 模型実験で認められた燃焼空洞の表面からの放射状の亀裂の発生原因について考察した³⁾。そして、500℃以上の温度の下で起こる石炭の熱収縮により燃焼空洞の周囲に引張応力が発生し、この引張り応力が放射状亀裂を発生させた可能性があることを指摘した。さらに、塊炭の燃焼の様子を目視観察し、石炭の乾留現象と同様のプロセスを経て亀裂が発生した可能性があることを指摘した⁴⁾。

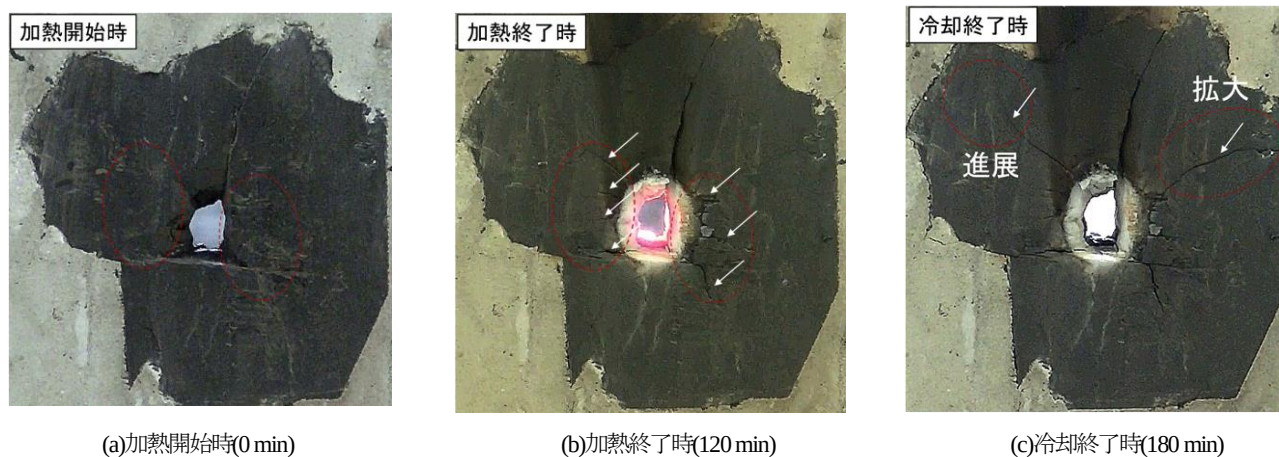
本研究では、粉炭を加熱・冷却し、亀裂の発生プロセスの観察を行うとともに、亀裂の発生と温度の関係を分析し、亀裂の発生メカニズムを考察する。



(a) Massive coal

(b) Crushed coal B

図 1 Cross section view of the coal specimens after combustion and gasification²⁾



(a)加熱開始時(0 min)

(b)加熱終了時(120 min)

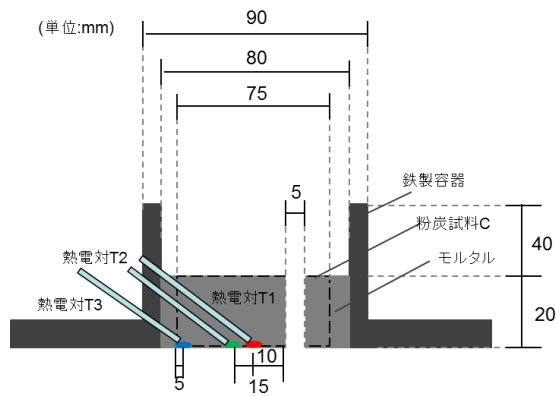
(c)冷却終了時(180 min)

図 2 貫通型供試体の観察面の様子⁴⁾

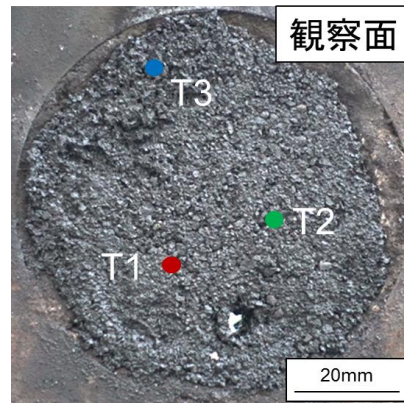
2. 実験方法

2.1 供試体の作成

株式会社砂子組砂子炭鉱の美唄層 2 番層から採取したから採取したブロック炭を粉碎し、粒径を 5mm 以下にして、次の手順で供試体 C (貫通型) と供試体 D (非貫通型) の 2 つの供試体を作製した (図 3.4)。①内径 80mm、高さ 60mm の金属製の中空円筒容器内側にモルタルを 2.5mm の厚さになるよう塗装する。② 24 時間静置しモルタルを固化させた後、直径 3.5mm のドリルを用いて、中空容器の外側から加熱用の孔に向け、3 つの孔を穿孔する。③これらの孔に熱電対を挿入し、熱電対と孔の隙間を耐熱パテで充填する。④粉碎した石炭と水を混ぜ合わせ、20mm の高さになるまで充填し 2.5N で圧密する。この時、円形の棒を差し込み、供試体 C には熱電対 T3 と対称な位置付近に直径 5mm の加熱用の孔を開けておく。⑤24 時間静置し、石炭内の水分を気化させる。

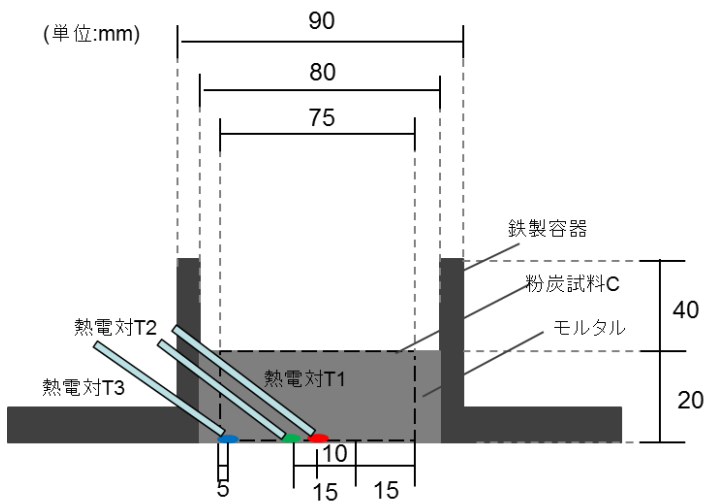


(a)概略図

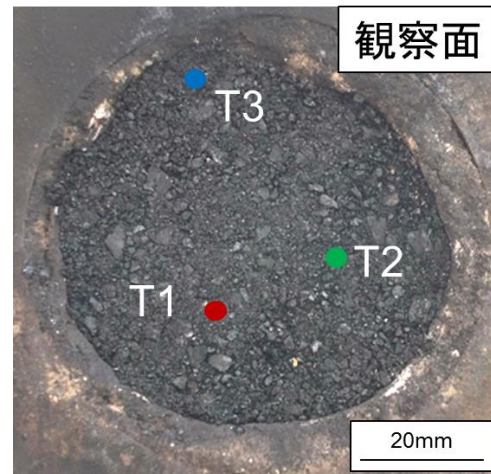


(b)概観と熱電対の位置

図3 供試体C(貫通型)



(a)概略図



(b)概観と熱電対の位置

図4 供試体D(非貫通)

2.2 実験システム

実験システムの概略図を図5に示す。供試体の加熱には市販のガスバーナーを使用し、供試体の加熱面、観察面をそれぞれカメラで撮影すると同時に、熱電対により石炭試料内の温度を計測した。供試体C（非貫通型）、供試体D（貫通型）の下部をガスバーナーで60分間加熱した。加熱終了後、供試体を放置し30分間自然冷却した。

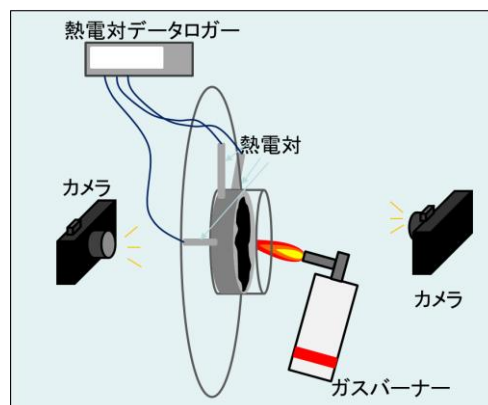


図5 実験システムの概略図

3. 実験結果と考察

3.1 供試体Cに対する実験

供試体Cを用いた試験における熱電対の位置の温度を図6に示す。空洞に近いT1から順に温度が上昇し、最高温度は1,219℃である。このように非常に高温になったのは、石炭の燃焼により、熱電対が露出し、ガスバーナーの火炎が熱電対に直接触れていたことが原因であると考えられる。また、T1, T2の冷却速度がT3よりも速いのも熱電対が露出していることが原因であると考えられる。

加熱時と冷却時における供試体C(貫通型)の観察面の様子の一例を図7に示す。図より、加熱が進むにつれ空洞が広がっていることがわかる。また、加熱終了時において、燃焼空洞から複数の亀裂が空洞に対して半径方向に発生していることがわかる。冷却時に新たな亀裂の発生は確認されなかった。図8に加熱時と冷却時における供試体C(貫通型)の加熱面の様子の一例を示す。図7と同様に空洞から半径方向に亀裂が発生していることが分かる。また、加熱過程と冷却過程で石炭が収縮し、モルタルと石炭の間に隙間ができていることが確認された。冷却終了後に石炭試料を手で加圧してみたが、粉炭粒子が接着し固形化していることが確認された。

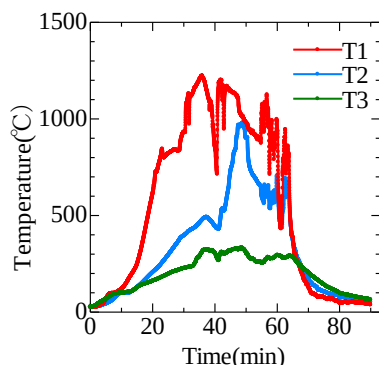


図6 加熱過程と冷却過程における供試体Cの温度



図7 供試体C(貫通型)の観察面の様子



(a)加熱開始時(0 min)



(b)加熱終了時(60 min)



(c)冷却終了時(90min)

図8 供試体C（貫通型）の加熱面の様子

3.2 供試体Dに対する実験

供試体Dを用いた試験における熱電対の位置の温度を図9に示す。T1から順に温度が上昇し、最高温度は $1,156^{\circ}\text{C}$ に達した。このように非常に高温になった原因は上述した供試体Cと同様と考えられる。

加熱時と冷却時における供試体D(非貫通型)の観察面の様子の一例を図10に示す。供試体C(貫通型)と同様に加熱過程と冷却過程で石炭が収縮し、モルタルと石炭の間に隙間ができていることが確認された。

さらに、加熱開始から23分後と25分後の供試体D(非貫通型)の観察面の様子を図11に示す。図中点線内部(T1近傍)の石炭が急激に収縮し、ガスの噴出を伴いながら亀裂が生成していたことが確認された。この間に、T1の温度は 469°C から 704°C へ上昇している。このように、亀裂が頻発する温度領域があると考えられるため、亀裂と温度の関係について分析した(図12)。図12(a)に示すように熱電対T1とT2の先端を中心に 15mm の円を描き、図12(b)のようにこの円内の画像データを2値化して亀裂を抽出した。円内の全ピクセル数に対する亀裂のピクセル数の割合と温度の関係を図13に示す。図より、T1、T2共に 500°C 以上の温度で亀裂の割合が急激に増加し、この温度付近で亀裂が発生、進展していることがわかる。また、供試体Cと同様に冷却終了後に粉炭粒子が接着し固形化していることが確認できた。

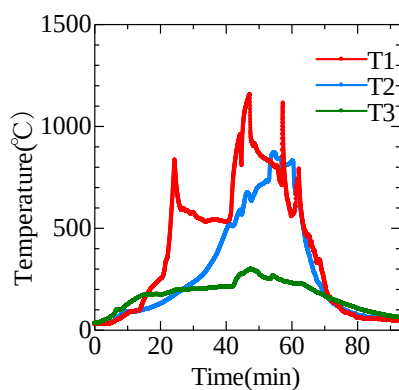


図9 加熱過程と冷却過程における供試体Dの温度

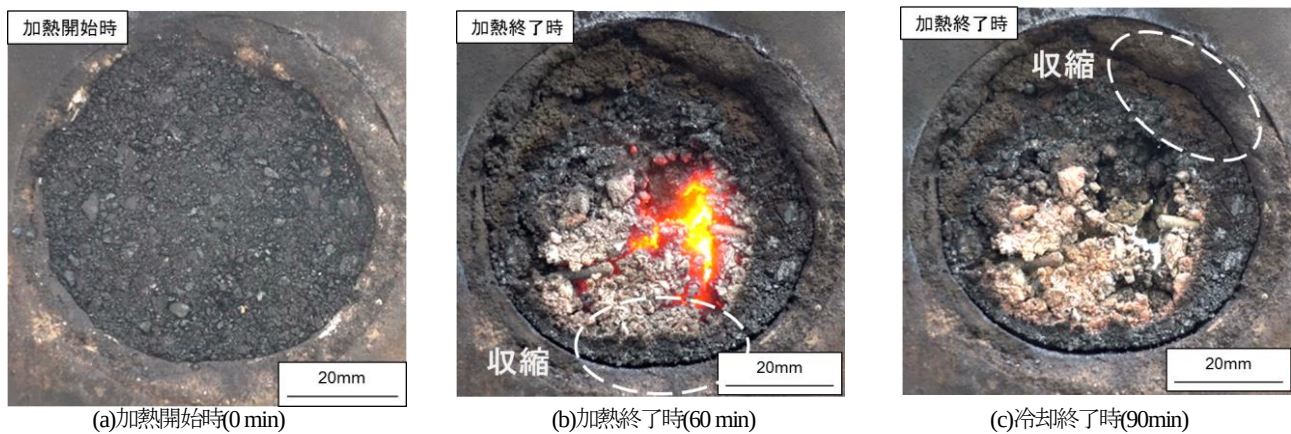


図 10 供試体 C (貫通型供試体) の観察面の様子

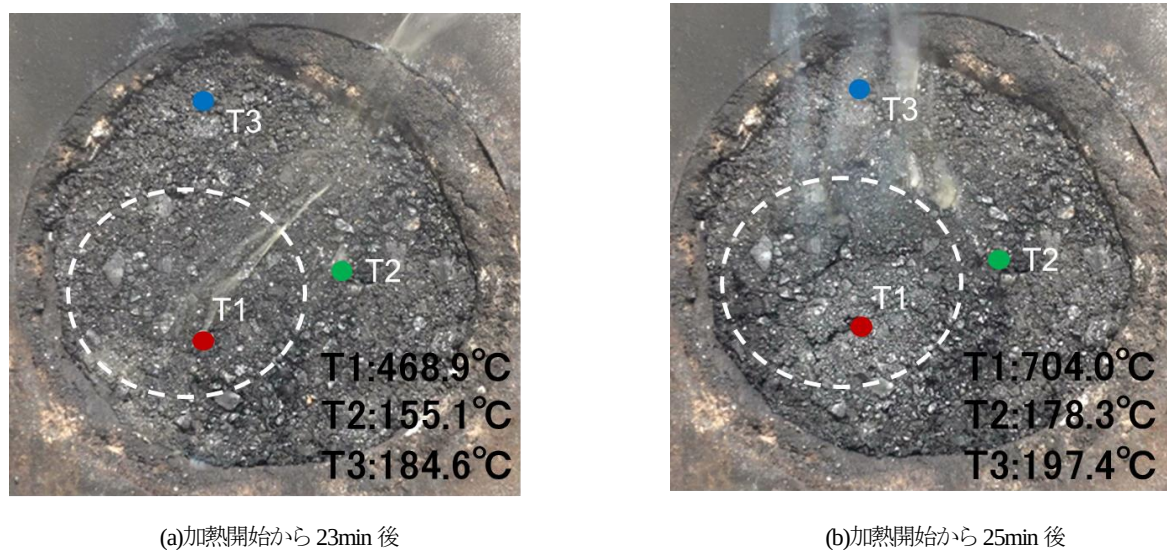


図 11 供試体 D (非貫通型供試体) の観察面の様子

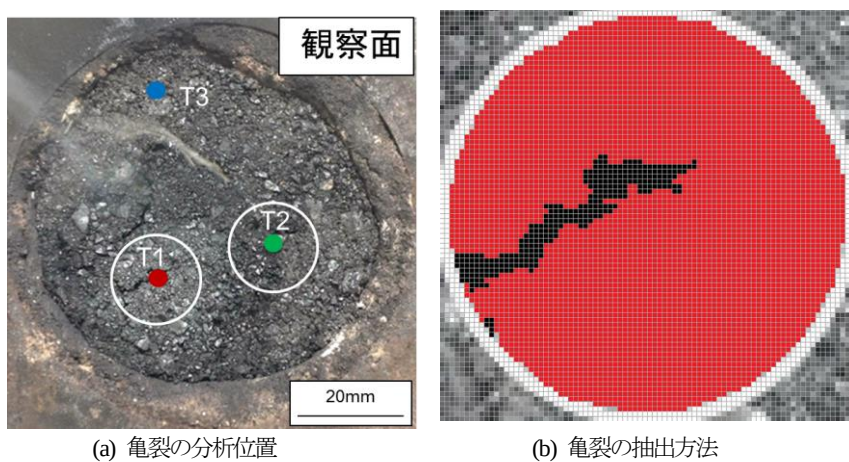


図 12 供試体 D の亀裂の分析方法

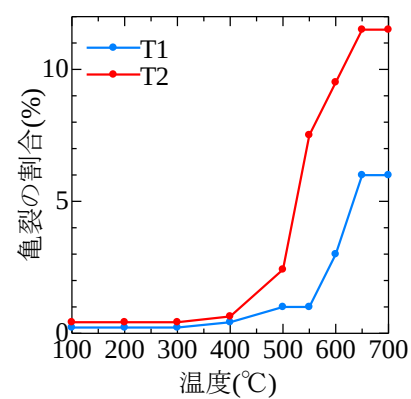


図 13 亀裂の割合と温度の関係

3.3 亀裂の発生メカニズムに関する考察

石炭の乾留時に見られる現象により、亀裂が発生した可能性が考えられる。一般に石炭の乾留とは、温度によって以下の3つの領域を経て石炭がコークス化する現象である⁵⁾。

領域A: 熱膨張領域 (20℃~400℃)

領域B: 軟化溶融領域 (400℃~500℃)

領域C: 熱収縮領域 (500℃~)

冶金用のコークス製造のための乾留過程では、微粉炭は熱分解とともに軟化し、揮発である低分子ガスが粒子内に発生する。これが温度上昇とともに膨張することにより周囲の粉炭粒子と接着する。ここまではBの軟化溶融領域までに起こる現象である。Cの熱収縮領域では軟化した石炭が再固化してセミコークスになる。その際、内部のガス気泡の結合や脱気により石炭が収縮し、熱応力により亀裂が生じる(図14⁶⁾)。供試体Dを用いた実験では、500℃~700℃の温度範囲で亀裂の割合が急激に増加したが、これは上記の石炭の乾留プロセスの熱収縮過程の温度範囲と一致する。また、供試体Dの観察面ではガスの噴出と収縮を伴った亀裂の発生と加熱面における著しい石炭の収縮が確認されており、これらは乾留時の熱収縮過程における石炭の挙動と一致している。また、供試体C、Dともに実験終了後に粉炭が固形化していたことも乾留時の軟化溶融領域で見られる現象と一致している。以上のことから、本実験においても石炭の乾留時と同様な現象が起き、粉炭が固形化するとともに石炭の熱収縮に起因して亀裂が発生したと推測できる。したがって、小規模 UCG 模型試験において観測された放射状亀裂も同様のメカニズムで発生した可能性が高いと考える。

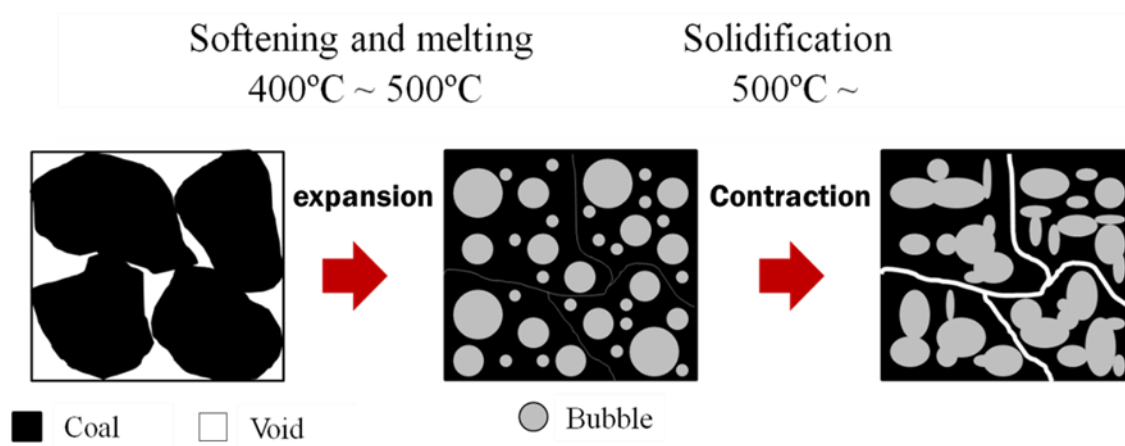


図14 石炭の乾留概念図⁶⁾

4. まとめ

小規模 UCG 模型試験で観測された粉炭試料内での放射状亀裂の発生メカニズムの解明を目的とし、加熱、冷却時における粉炭供試体内での亀裂の発生プロセスを観察した。そして、亀裂の発生と温度の関係を分析したうえ、亀裂の発生メカニズムについて考察した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 加熱過程で石炭の収縮、ガスの噴出を伴った亀裂の発生が確認され、その温度は500℃以上であった。
- 2) 実験終了後には粉炭同士が接着し固形化していた。
- 3) 上記のことから、小規模 UCG 模型試験でも微粉炭の乾留時と同様な現象が起こり、粉炭が固形化した後、収縮し、石炭内に引張の熱応力が発生し、放射状亀裂が発生したと考えられる。

5. 引用文献

- 1) F. Q. Su, A. Hamanaka, K. Itakura, G. Deguchi, K. Sato and J. Kodama: Energy & Fuels, 31 (2016), 154-169
- 2) 児玉淳一他(2018), Journal of MMIJ, Vol.134, No.7, UCG 模型試験における破碎炭と塊炭の燃焼・ガス化特性の比較, pp.97-xx.
- 3) 児玉 淳一他(2018), 資源・素材講演集 Vol.5, No.2, 小規模 UCG 模型実験における人工炭層内の熱応力に与える境界条件の影響, 3501-07-02
- 4) 児玉 淳一他(2019), 資源・素材講演集 Vol.6, No.2, 加熱と冷却により発生する石炭内のき裂の観察, 2K0201-07-05
- 5) 板垣省三他(1996), コークス生成過程における熱応力と組成変形挙動解析, 鉄と鋼, Vol.82, No.5, pp.70-74
- 6) 一般行政法人 日本エネルギー協会(2013), 石炭の科学と技術 未来につなぐエネルギー, コロナ社 pp.149-151,178-179,190-219