

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 革新型研究開発（若手枠）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 2RF-2202

体系的番号 : JPMEERF2022R02

研究課題名 : グリーンタフ地域におけるCO<sub>2</sub>地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究

Project Title : Practical Research for the Site Selection of CCS in Green Tuff Region

研究代表者 : 高谷 雄太郎

研究代表機関 : 東京大学

研究分担機関 :

キーワード : CO<sub>2</sub>地中貯留、CO<sub>2</sub>鉱物トラッピング、グリーンタフ、水岩石反応実験

注：研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 .....	<b>1</b>
研究課題情報 .....	<b>3</b>
<基本情報> .....	3
<研究体制> .....	3
<研究経費の実績> .....	3
<研究の全体概要図> .....	4
<b>1. 研究成果 .....</b>	<b>5</b>
1. 1. 研究背景 .....	5
1. 2. 研究目的 .....	5
1. 3. 研究目標 .....	6
1. 4. 研究内容・研究結果 .....	6
1. 4. 1. 研究内容 .....	6
1. 4. 2. 研究結果及び考察 .....	6
1. 5. 研究成果及び自己評価 .....	15
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 .....	15
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価 .....	15
1. 6. 研究成果発表状況の概要 .....	16
1. 6. 1. 研究成果発表の件数 .....	16
1. 6. 2. 主要な研究成果発表 .....	17
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動 .....	18
1. 7. 國際共同研究等の状況 .....	18
1. 8. 研究者略歴 .....	18
<b>2. 研究成果発表の一覧 .....</b>	<b>19</b>
(1) 産業財産権 .....	19
(2) 論文 .....	19
(3) 著書 .....	19
(4) 口頭発表・ポスター発表 .....	19
(5) 「國民との科学・技術対話」の実施 .....	19
(6) マスメディア等への公表・報道等 .....	19
(7) 研究成果による受賞 .....	20
(8) その他の成果発表 .....	20
<b>権利表示・義務記載 .....</b>	<b>20</b>

Abstract

## 研究課題情報

## &lt;基本情報&gt;

研究区分 :	革新型研究開発（若手枠）
研究実施期間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域 :	気候変動領域
重点課題 :	【重点課題7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発 【重点課題4】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用
行政ニーズ :	(1-5) 2050年カーボンニュートラルの達成のための土地利用分野CO <sub>2</sub> 吸排体量シミュレーターの開発
課題番号 :	2RF-2202
体系的番号 :	JPMEERF20222R02
研究課題名 :	グリーンタフ地域におけるCO <sub>2</sub> 地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究
研究代表者 :	高谷 雄太郎
研究代表機関 :	東京大学
研究分担機関 :	
研究協力機関 :	

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「グリーンタフ地域におけるCO<sub>2</sub>地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究」

## &lt;サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者&gt;

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	東京大学	工学系研究科	准教授	高谷雄太郎	

注： 研究協力者は公開の了承があった協力者名のみ記載されます。

## &lt;研究経費の実績&gt;

年度	直接経費（円）	間接経費（円）	経費合計（円）	備考（自己充当等）
2022	4,616,000	1,384,000	6,000,000	0
2023	4,616,000	1,384,000	6,000,000	0
2024	4,615,385	1,384,615	6,000,000	0
全期間	13,847,385	4,152,615	18,000,000	0

注： 環境研究総合推進費の規定する研究経費の支援規模を超えた額は自己充当等によるものです。

## &lt;研究の全体概要図&gt;



## 1. 研究成果

### 1. 1. 研究背景

パリ協定の発効や「2050年カーボンニュートラル（CN）」宣言を受け、我が国においても脱炭素社会の実現に向けた取り組みが加速化している。エネルギー利用効率の向上による温室効果ガスの排出削減はこうした取り組みの一環だが、一方で社会全体でのCNの実現（実質排出量ゼロ）には何らかの手法で直接的にCO<sub>2</sub>を大気から隔離・固定することが必須となる。CO<sub>2</sub>の地中貯留はCNの実現に向けたキーテクノロジーだが、大規模な実施に当たっては社会的受容性の観点から安全性を確実に担保することが求められる。そこで注目されているのが玄武岩層によるCO<sub>2</sub>貯留である。玄武岩は反応性が高く、CaやMgなどの炭酸塩鉱物を容易に形成する2価のカチオンを多く含むことから、注入されたCO<sub>2</sub>を炭酸塩鉱物として効率的かつ安全に固定すること（鉱物固定）が期待される（例えばMatter et al., 2016）。

一方、我が国では大規模な玄武岩帯が存在せず、そのため鉱物固定の重要性も十分に認識されてはいない。このような中、申請者らは日本海沿岸域から北海道にかけて広く分布するグリーンタフ（緑色凝灰岩）層に着目した。グリーンタフは、およそ2000万年前～1500万年に日本海の形成・拡大に伴って海底に噴出した凝灰岩であり、陸域においては日本海沿岸域から北海道にかけて、海域を含めると日本海東部の海底下にも広く分布する。海底のマグマ活動により生じる熱水の影響から、その多くが変質作用を被っており、緑泥石などの鉱物を含むため緑色を呈することを大きな特徴とする。グリーンタフは、化学的な組成にばらつきがあるものの、一部は玄武岩質から安山岩質の組成をもち、比較的多くのCaやMgを含有する。さらに凝灰岩であるため空隙率が高いことから貯留岩として非常に有望な特性を持つ。事実、グリーンタフの一部地域は石油の貯留岩となっている。申請者らは、2010年から2013年にかけ、このようなアイデアに基づいて、CO<sub>2</sub>との反応試験に基づくグリーンタフ質岩石のCO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルの評価を実施した。3種のグリーンタフ岩石を用いた試験の結果、岩石種によりCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルが大きく変わること、一部のグリーンタフは玄武岩層に匹敵する程度（7割程度）のCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを持つことを明らかにした（Takaya et al., 2015）。しかし、グリーンタフ岩石は変質の程度によって鉱物組成が大きく異なるため、その反応特性は十分に明らかになっていない。同地域におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の大規模実施に向けては、より網羅的にグリーンタフ質岩石を採取し、その岩石学的な多様性を明らかにするとともに、反応実験に基づく反応特性把握を進めていく必要がある。

### 参照文献

Matter, J.M., Stute, M., Snaebjornsdottir, S.O., Oelkers, E.H. et al., 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352(6291), 1312-1314. DOI : 10.1126/science.aad8132

Takaya, Y., Nakamura, K., Kato, Y., 2015. Dissolution of altered tuffaceous rocks under conditions relevant for CO<sub>2</sub> storage. *Applied Geochemistry* 58, 78-87. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.002

### 1. 2. 研究目的

上述の通り、グリーンタフは生成した場所や年代によって化学的な組成をえることに加え、変質の程度によって幅広い鉱物組成を示す。そこで、分布域より岩石試料を網羅的に採取しこれらを実験に用いることで、化学・鉱物学的組成からCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを推定可能なモデルを構築する。これと並行して、CO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルという指標からグリーンタフ地域におけるCO<sub>2</sub>貯留候補地の選定を試みる。グリーンタフ地域は沿岸部を中心に分布するため、その分布域内には火力発電所や工業地帯などが多く存在する。これらの大規模CO<sub>2</sub>発生源から一定距離内にかけて海域に広がるグリーンタフ層を貯留候補とする。これは、周辺環境・社会への配慮から陸域におけるCO<sub>2</sub>貯留は現実的でないことに加え、海域では岩石層上部に存在する堆積物層がCO<sub>2</sub>漏洩を抑制する“cap-rock”として機能することが期待されるからである（Takaya et al., 2013）。

本研究の目的は、岩石の反応性に着目し、注入されたCO<sub>2</sub>を鉱物として安全・安定的に固定可能な岩相を貯留候補地として提示することである。CNの実現に必須の技術であるCO<sub>2</sub>地中貯留の大規模実現に向けて最も困難な課題でもある貯留候補地選定に直接的に寄与するものであることから、環境政策の立案のみならずCO<sub>2</sub>を排出する各事業者らに対しても有用な情報となることが期待される。

### 参照文献

Takaya, Y., Nakamura, K., Kato, Y., 2013. Geological, geochemical and social-scientific assessment of basaltic aquifers as potential storage sites for CO<sub>2</sub>. *Geochemical Journal* 47(4), 385-396. DOI: 10.2343/geochemj.2.0289

### 1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	グリーンタフ地域におけるCO <sub>2</sub> 地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究
全体目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリーンタフ質岩石の化学組成・鉱物組成をパラメータとし、一意にCO<sub>2</sub>固定ポテンシャル（鉱物化速度と上限量）が定まるモデルを構築する。</li> <li>・CO<sub>2</sub>固定ポテンシャル、貯留性、経済性の総合的な観点から、グリーンタフ地域における貯留候補地の選定・優先順位付けを実施する。</li> <li>・プレスリリースなどを通して、候補地に関する情報を広く公開しその周知を図る。</li> </ul>

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	グリーンタフ地域におけるCO <sub>2</sub> 地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究
サブテーマ1実施機関	東京大学
サブテーマ1目標	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリーンタフ質岩石の化学組成・鉱物組成をパラメータとし、一意にCO<sub>2</sub>固定ポテンシャル（鉱物化速度と上限量）が定まるモデルを構築する。</li> <li>・CO<sub>2</sub>固定ポテンシャル、貯留性、経済性の総合的な観点から、グリーンタフ地域における貯留候補地の選定・優先順位付けを実施する。</li> <li>・プレスリリースなどを通して、候補地に関する情報を広く公開しその周知を図る。</li> </ul>

### 1. 4. 研究内容・研究結果

#### 1. 4. 1. 研究内容

本研究テーマにおける実施内容を、岩石試料の採取（野外調査）、岩石試料の化学・鉱物学的分析、高温高圧反応試験の実施の3点に分けて記載する。

##### 実施内容1：岩石試料の採取

本研究では、沿岸域かつ大規模 CO<sub>2</sub>発生源近傍のグリーンタフ層から試料を採取するため、図1の白抜き赤星で示す6地域において地質調査を実施した。

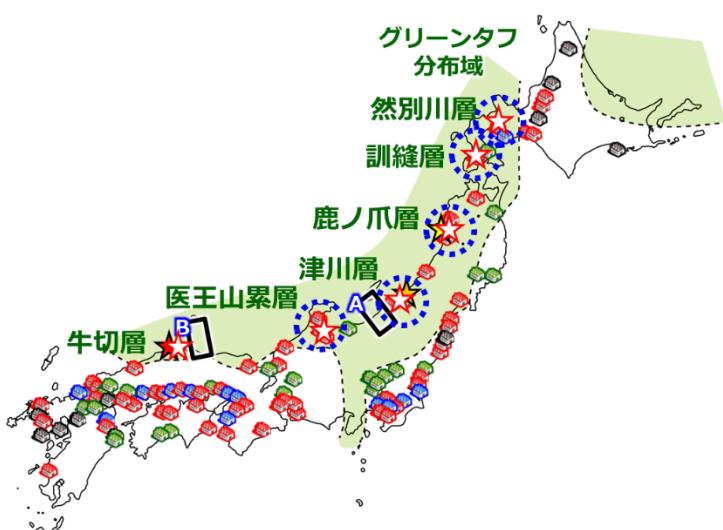


図1 本研究における調査地域

## 実施内容2：岩石試料の詳細分析

### 鉱物薄片観察

採取した岩石試料は、ダイヤモンドカッターによりチップ上に切りだした。この際、岩石表面に風化層が確認される場合は、切り出しの際に全て除去した。チップの一部は、光学顕微鏡観察に用いる薄片に加工した。残量については、後述する反応試験及び化学分析用とした。

### 化学分析

上記で準備した岩石チップは、メノウ乳鉢を用いて63–125  $\mu\text{m}$ まで粉碎し、63  $\mu\text{m}$ 以下の粒子はエタノールにより全て洗い流した。本試料の一部をさらに粉碎し、これを用いて蛍光X線分析装置（XRF）による全岩化学分析およびX線回折（XRD）による結晶相同定（構成鉱物の同定）を行った。

### 透水率測定

得られた試料のうち4点に対して、透水率の測定を実施した。これらの試料については、直径5cm×高さ5cmの円柱状の供試体を作成し測定に用いた。試験法は低透水性材料の透水試験方法（JGS 0312）に準じ、応用地質株式会社において実施した。

## 実施内容3：高温高圧反応試験

### 高温高圧実験システムの構築

高温高圧試験を実施するにあたり、高温高圧実験用のシステムを構築した（図2）。本システムは、オーエムラボテック社の高圧マイクロリアクターMMJ型をベースとして、反応容器を耐塩性・耐酸性の高いハステロイC22（Ni合金）として作成したものである。同時に、同社のミニリアクターMS100-Cの反応容器をハステロイC22として作成した機器も併用した。いずれも反応容器のサイズは100 mlであり、高圧マイクロリアクターは最大運転温度・圧力が300°C・20 MPa、ミニリアクターMS100-Cは最大運転温度・圧力が200°C・5MPaである。

### 粉末試料を用いた反応試験

準備した63–125  $\mu\text{m}$ の試料を用いて、反応実験を実施した。反応温度は150°C、CO<sub>2</sub>分圧（全圧）は MPaとして、反応期間は最大で2週間とした。粉末を用いた反応実験は、主に試料間における反応性の違いを明らかにすることを目的とした。反応装置にはミニリアクターMS100-Cを用いた。

反応期間経過後、容器内部を50度まで冷却してから脱圧し、反応溶液を回収した。反応溶液についてはpHの測定を実施した。溶液試料と固体試料は遠心分離により分離し、溶液試料はさらに0.45  $\mu\text{m}$ のフィルターによってろ過し、適切に希釈後誘導結合プラズマ発光分析装置（ICP-OES）により各種元素濃度を測定した。また、一部の試料については0.1 M HClによる滴定作業により重炭酸イオン濃度を測定した。固体試料については、60°Cで乾燥後、分取して全炭素量（TC: Total Carbon）を測定した。また、XRD分析により鉱物相の変化を調べた。

### キューブ試料を用いた反応試験

反応特性の影響を調べるために加え、岩石の物理的な性質、具体的には透水係数の違いによって反応進行速度がどの程度変化するかを明らかにするため、キューブ試料を用いた反応試験を実施した。本試験は、透水係数に大きな違いの確認された2試料（SK: 然別川層グリーンタフ、I0: 医王山類層グリーンタフ）について、1 cm角のキューブ状に加工して反応試験を実施した。本試験には高圧マイクロリアクターMMJ型を使用し、反応による岩石変質の差が見やすくなるよう、反応温度は200°C、CO<sub>2</sub>分圧（全圧）は4.8 MPaとした。また、反応期間は14日とした。

反応の前後で、X-CTによる岩石断面の可視化をおこない、岩石表層からどの程度まで反応が進行しているかを検証した。さらに、反応後のキューブ試料については、切断面を観察し、実体顕微鏡下でも反応の進行の程度を検証した。

### 1. 4. 2. 研究結果及び考察

#### 結果と考察①：岩石試料の採取

岩石試料の採取を目的とした野外調査は以下の6地域で実施した。試料名冒頭にある略字を各層のサンプル名とする。

- ① SK: 然別川層（北海道余市郡赤井川村）
- ② KN: 訓縫層（北海道松前郡福島町）
- ③ KT: 鹿ノ爪層（秋田県由利本荘市）
- ④ TG: 津川層（新潟県東蒲原郡）



図2 高圧マイクロリアクターMMJ型外観

- ⑤ IO：医王山累層（富山県南砺市）  
 ⑥ UK：牛切層（島根県出雲市）

上記はいずれもグリーンタフ層であり、北海道から島根までの広い分布範囲を網羅するように試料採取を試みた。しかし、⑥の牛切層では、沿岸部の道路が台風の影響による復旧工事で通行止めとなっており、採取がかなわなかった。

それぞれの外観写真を図3に示す。



図3 採取試料の外観写真

①SK、②KN、③KT、④TG、⑤IOについて③KTを除くすべての岩石断面が緑色を帯びているが、試料によってその色調は様々である。特に②KNについては濃緑色を示すのに対し、④TGでは明るい黄緑色を呈する。①SKおよび⑤IOのサンプルについては淡い緑色を呈し、①SK試料には白いパッチが肉眼でも確認された。外観写真からも、一口にグリーンタフ質岩石と言っても、化学組成・鉱物組成が広く変化することが確認できる。

## 結果と考察②：岩石試料の詳細分析

### 岩石試料の化学組成分析

採取した5試料について、岩石チップの切り出しを行ってから詳細な観察を行った。この結果、KTについてはグリーンタフに特徴的に観察される変質が確認できず、グリーンタフ質岩石と認定することが出来なかつたため今回の実験試料からは省いて検証を進めることとした。それ以外の岩石については、粉末化後にXRF分析を実施し、化学組成を測定した。分析値を表1に示す。グリーンタフ質岩石については、SiO<sub>2</sub>の濃度がSKの52.3%からIOの80.2%まで広い範囲に分布しており、4試料で凝灰岩の化学組成変化が広く網羅されていることが分かる。表にはTCの量も示す。

次に、各試料のXRD分析結果を図4に示す。

表1 各試料化学組成

[wt%]	SK	KN	IO	TG
SiO <sub>2</sub>	52.32	61.49	80.21	74.30
TiO <sub>2</sub>	0.88	0.95	0.32	0.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.10	16.03	11.10	13.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.99	8.39	2.53	1.89
MnO	0.29	0.20	0.08	0.02
MgO	3.92	3.22	0.42	1.74
CaO	14.33	3.69	1.11	2.41
Na <sub>2</sub> O	2.60	3.25	1.53	1.61
K <sub>2</sub> O	1.31	1.96	2.27	3.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.16	0.01	0.01
Total	98.84	99.34	99.59	98.65
LOI	12.73	2.11	2.55	7.33
Total Carbon (TC)	1.584	0.04178	0.03063	0.01147

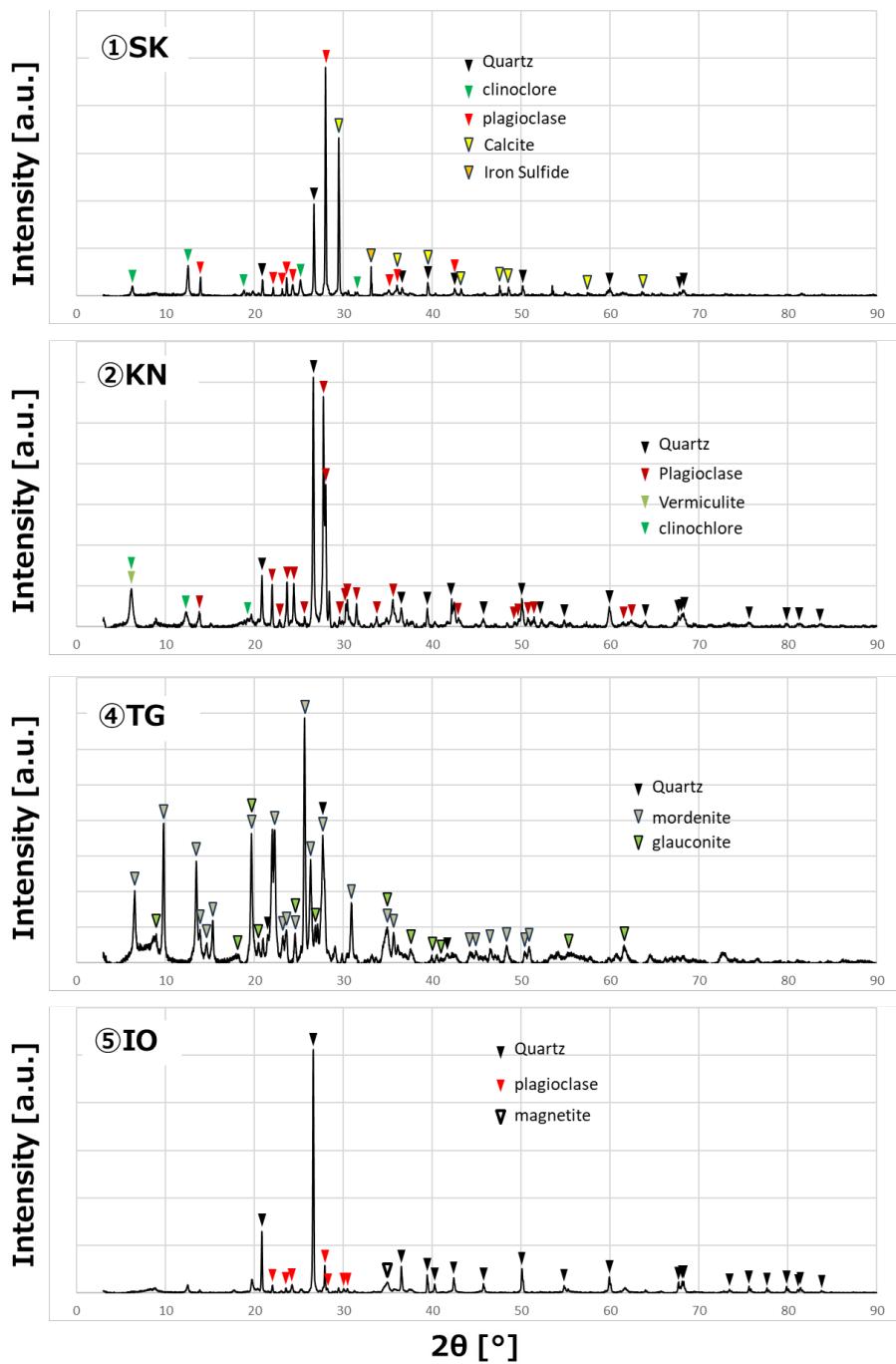


図4 グリーンタフ試料のXRD分析結果

試料はそれぞれ異なる鉱物組成を示し、例えば、SKは斜長石 (Plagioclase:  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) やクリノクロア (Clinochlore:  $(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ )、石英 (Quartz:  $\text{SiO}_2$ ) などが確認された。同試料の薄片観察では普通輝石 (Augite:  $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ ) が普遍的に確認されたが、これは方解石 (Calcite:  $\text{CaCO}_3$ ) のピークと重なっていると考えられる。KNやTGには変質鉱物としてバーミキュライト (Vermiculite:  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) やクリノクロア、モルデナイト (Mordenite:  $(\text{Na}_2, \text{Ca}, \text{K}_2)_4(\text{Al}_8\text{Si}_{40})\text{O}_{96} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$ )、グローコナイト (Glauconite:  $(\text{K}, \text{Na})(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) などの粘土鉱物や沸石が多く確認された。一方で、IOは変質の程度が弱く、明確な変質鉱物ピークは確認されなかった。

化学組成データおよび結晶相データから決定した、各試料の鉱物組成計算値を表2に示す。計算により一意に定まらない値については、鏡下で観察された割合およびXRDによるピーク強度を参考にした。また、低結晶性の粘土やガラスなど、XRDにおいてピークが検出されないものについてはまとめて表記 (Glass/Poorly crystalline clay) した。なお、ガラスの組成が不明であるため、石英の含有量については仮定により数字が大きく上下するが、後述する  $\text{CO}_2$  鉱物固定ポテンシャルの議論には影響を与えないため、

ここでは議論の対象としない。

SKは普通輝石や斜長石を多く含み、鉱物組成からもCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルが高いことが想定される。変質鉱物としては、クリノクロアを含むが、その量は3.5 wt%と普通輝石や斜長石に対してわずかな量である。低ガラス/結晶性粘土中にCaやMgはほとんど分配されない。これに対して、IOの岩石試料は斜長石や黒雲母の重量は合算でも5wt%程度である。明確な変質鉱物は含まれない。ガラス/結晶性粘土中にはCaやNa、Kの大部分が分配される。TGは、変質により生じたと考えられる沸石の一種であるモルデナイトを多く含み、ここに少量のグローコナイトを含む。本試料もガラス/結晶性粘土中にCaやMg、Na、Kの大部分が含まれる。また、KNは斜長石を18 wt%程度含むことから、高い反応性が期待される。一方で、試料外観は極めて濃緑色を呈しており、これを裏付けるようにクリノクロアやバーミキュライトなどが20 wt%以上含まれる。

一連の観察などから、変質の程度はIOが最も弱く、SKがこれに続く。KNの変質の程度は高いが、まだ斜長石が残存している。FTは、3種の試料の中でも非常に激しい変質を受けており、火山岩に初期的に存在する主要造岩鉱物が石英以外確認されない。

表2 各試料の鉱物組成計算値

[wt %]	SK	KN	TG	IO
Quartz	10.0	30.0	50.0	60.0
Augite	24.9	-	-	-
Plagioclase	14.3	17.9	-	3.0
Biotite	5.0	-	-	1.7
Clinochlore	3.5	6.5	-	-
Calcite	3.6	-	-	-
Pyrite	2.0	-	-	-
Magnetite	-	-	-	1.0
Mordenite	-	-	17.1	-
Glaucite	-	-	2.0	-
Vermiculite	-	14.1	-	-
Glass / Poorly Crystalline Clay	36.6	31.4	30.9	34.3

#### 岩石試料の透水係数測定

SK、IO、TG、KNの計4試料に対する透水係数の試験の様子を図5に示す。また、測定結果を表3に示す。

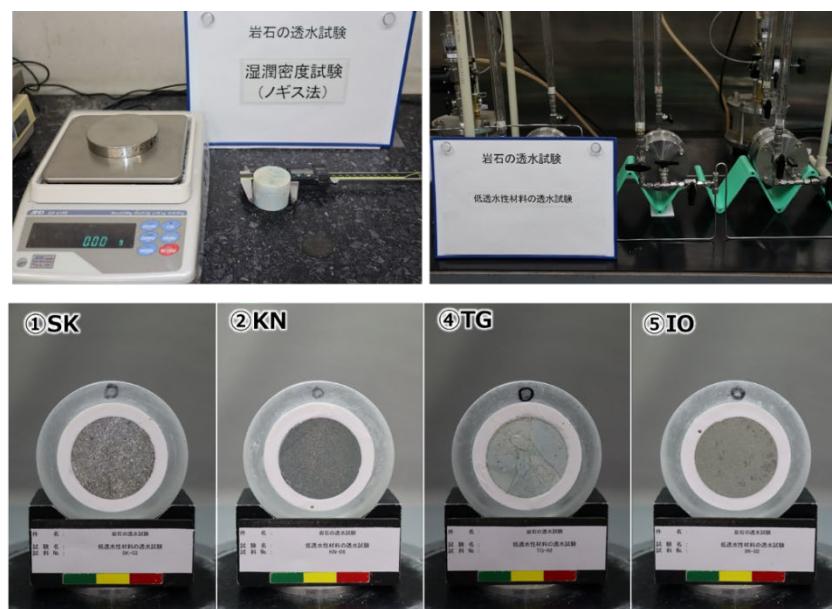


図5 透水係数測定試験の様子

表3 グリーンタフ試料の湿潤密度および透水係数測定結果

Sample	Bulk wet density [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hydraulic conductivity [m/s]
SK	2.266	$1.11 \times 10^{-11}$
KN	2.366	$1.01 \times 10^{-12}$
TG	1.740	$4.82 \times 10^{-11}$
IO	2.494	$1.91 \times 10^{-12}$

透水係数はいずれも非常に低く、 $1 \times 10^{-12}$  m/s～ $5 \times 10^{-11}$  m/s程度の値を取った。特にKNやIOは低い透水係数を示しており、これは岩石全体での反応進行が極めて遅くなる可能性を示している。

### 結果と考察③：反応試験の結果

#### 粉末試料を用いた反応試験の結果

粉末試料を用いた反応試験における、反応溶液および固相分析の結果を表4に示す。また、pHについては冷却・脱圧後に測定しているため、測定された各種元素濃度から150°C、CO<sub>2</sub>分圧30MPaの条件を仮定し、地球化学モデリングコードであるPHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) により計算値を求めた。同時に、最も一般的な炭酸塩鉱物として方解石 (calcite) を選定し、その飽和指数を計算した。

表4 反応溶液および反応後固体試料の各種分析結果

Sample	Reaction time [days]	pH (measured)	pH (calculated)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mmol/L]	Concentration [mmol/L]						Saturation Index of Calcite	TC of the reacted rock sample [%]		
		Si	Na	Al	Mg	Ca	Ti	Mn	Fe					
SK	3	6.06	5.50	23.2	3.03	1.32	0.13	0.39	11.68	b.d.l.	0.05	b.d.l.	1.11	1.808
SK	7	5.97	5.45	26.7	1.37	2.59	b.d.l.	0.10	9.42	b.d.l.	0.05	0.09	0.95	1.428
SK	14	6.13	5.51	26.9	2.42	3.35	b.d.l.	0.20	10.88	b.d.l.	0.01	b.d.l.	1.10	1.888
KN	3	7.14	4.74	1.7	2.09	2.34	b.d.l.	0.17	0.27	b.d.l.	0	b.d.l.	-1.69	0.031
KN	7	5.75	4.96	8.4	3.25	3.55	b.d.l.	0.44	0.84	b.d.l.	0.02	b.d.l.	-0.83	0.024
TG	3	5.23	4.69	3.4	7.92	1.73	0.11	0.17	0.42	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	-1.59	0.035
TG	7	5.82	4.82	5.0	7.55	1.90	0.02	0.28	0.77	b.d.l.	0.00	b.d.l.	-1.11	0.035
IO	3	5.71	5.17	15.0	2.49	1.69	b.d.l.	0.04	4.01	b.d.l.	0.14	b.d.l.	0.17	0.081
IO	7	5.58	5.11	28.3	3.18	2.29	b.d.l.	0.02	2.97	b.d.l.	0.10	b.d.l.	-0.06	0.085
IO	14	5.59	4.93	10.2	4.78	2.58	b.d.l.	b.d.l.	1.32	b.d.l.	0.00	b.d.l.	-0.69	0.097

pH計算値は、SKを対象とした場合には概ね5.5程度で安定して推移した。5種の試料間では、特異的にCa濃度が高く3日の時点でも11 mmol/Lを超える値を示した。MgはCaと比較すると低い濃度であったが、最大で0.4 mmol/L程度の値を示した。重碳酸イオン濃度は安定して25 mmol/L程度の値を示している。これに対して、KNは5以下のpHで反応が進行し、CaやMgの濃度も7日目でそれぞれ0.84 mmol/L、0.44 mmol/Lと低い値を示した。TGを用いた試験では最も低いpHを示し、計算値では4.7-4.8の値を示した。Siの溶出量は5試料間で最も多く一方で、CaやMg濃度は低く、7日目でそれぞれ0.77 mmol/L、0.28 mmol/Lであった。重碳酸イオン濃度も5 mmol/Lと低い値を示した。IOを用いた試験では、pHは概ね5.0程度を示すが、細かく見ると反応開始3日目から14日にかけて緩やかに低下する。Ca濃度は3日目が4.01 mmol/Lと最も高く、その後1.32 mmol/Lまで低下する。重碳酸イオン濃度は、PHREEQCによる計算値よりも高い数字を示したが、14日には10 mmol/Lまで低下した。

SKサンプルを用いた試験では、反応期間を通じて方解石の飽和度はプラスの値を示し、全期間を通して炭酸塩鉱物の生成が進んでいることを示唆する。また、テーブルには示していないが、ドロマイト (Dolomite: CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) についても飽和度は正となった。SKサンプルは方解石を含んでおり、初期的に急激な溶解が生じた結果、3日の時点から高い飽和度を示したことが示唆される。初期的な方解石の溶解反応が、炭酸塩鉱物の飽和状態を高く保ち、輝石や斜長石から溶出したCaやMgが液中に溜まることなく効率的に炭酸塩鉱物として沈殿したと推察される。方解石の飽和度は3日時点では正の値を示し、14日に向けて単調に減少しており、溶液の組成変化と対応することが分かる。SKが14日時点でも、高い方解石飽和度を示したのに対し、IOでは14日時点ですでにマイナスの値を示していることから、これ以上の炭素固定はあまり期待されないか、緩やかにしか進まないことが示唆される。TGについては、緩やかにCaやMgの濃度上昇は確認されるものの、カルサイトの飽和度は-1を下回る状態であり、CO<sub>2</sub>の固定は極めて緩やかにしか進まないか、ほとんど期待されないということが分かる。KNについては、初期的には低い方解石飽和度を示すが、時間に伴って着実に飽和度が大きくなる傾向が確認された。

化学組成および固体分析（全炭素量：TC）の結果から、各試料のCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを示す。各サンプルについて、CaOおよびMgOの含有量から、CO<sub>2</sub>固定最大値を算出するとSKでは岩石1kg当たり約120 g（初期に含まれる炭酸塩鉱物量は除く）、KNでは63 g、TGでは35 g、IOでは13 gとなる。これが各試料について期待される最大のCO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルである。TGは、35 g-CO<sub>2</sub>/kg-rockと、IOなどよりも高い固定ポテンシャル

を持つが、実際にはCaやMgの溶出量は僅かであり、TCの増加も確認されていない。これは、TGに含まれるモルデナイトやグローコナイトなどの変質鉱物の反応性が極めて低いことを示す。KNではMgのほぼ全量が変質鉱物として含まれる緑泥石に含まれている。上記の事例と同様、変質鉱物である緑泥石の反応性が低く、これらの変質鉱物がCO<sub>2</sub>の鉱物固定にほとんど寄与しないことを示している。また、透水係数が著しく低い試料であったため、63-125 μmの試料でも、粒子中心まで反応が進行していない可能性も高い。TCの分析結果では、SKおよびI0の試料で炭素量が増加した。それぞれの試料で、反応開始から14日までに11.1 g-CO<sub>2</sub>/kg-rock、2.4 kg-CO<sub>2</sub>/t-rock、1.8 kg-CO<sub>2</sub>/t-rockの二酸化炭素固定に相当する炭素量の増加が確認されている。特筆すべきはSKにおけるCO<sub>2</sub>固定量の多さだが、これは上述した岩石中に含まれる方解石の溶解が要因と考えられる。岩石中に初期的に炭酸塩鉱物が含まれていることによって、その溶解が進むことで炭酸塩鉱物の飽和度が反応初期から高く維持され、斜長石や輝石の溶解により供給されるCaやMgがスムーズに沈殿生成したと考えられる。

より長期的な試験を実施した場合、I0を用いた試験では、14日の時点で炭酸塩鉱物の飽和度がマイナスに転じており、これ以上の二酸化炭素固定は進みづらいことが考えられる。KNについては、斜長石などの溶解が十分に進み、炭酸塩鉱物の飽和度が十分に高まった段階から固相への炭酸塩鉱物固定が進んでいくことが期待される。SKについては化学組成から求まる最大CO<sub>2</sub>固定量も多いため、今回使用した試料の中では、速度・量ともに最もCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルの高い岩相であり、長期的には他試料と比較してさらに固定ポテンシャルの差が広がっていくと考えられる。

試験の結果、CO<sub>2</sub>地中貯留に際してCO<sub>2</sub>の鉱物固定に寄与する鉱物は、斜長石や輝石、角閃石といった未変質の主要造岩鉱物であることが示され、熱水変質により生じた粘土鉱物や沸石などはほとんど影響しないことが示唆された。またこれらは、反応の前後におけるXRD分析結果から推察される鉱物量の変化からも同様の結果が示唆された。

#### キューブ試料を用いた反応試験の結果

反応前後のキューブ試料のX線CT画像、反応後キューブ試料の断面写真を図6-7に示す。X線CT画像では判別が難しいが、SKでは試料周辺部を中心として、反応後に空隙が生じていることが分かる（図6）。これに対してI0では反応の前後において明確な差は判別できない。断面写真では比較的分かりやすく、SKの表面は凹凸に富み、表面から300-400 μm程度まで反応層（変色部）を確認することが出来た（図7）。これに対して、I0における反応層厚みは50-60 μm程度であり、反応の進行速度が約5-6倍程度も異なることが明らかになった。表3に記載した通り、SKおよびI0では透水係数が約6倍異なる（SK : 1.11 × 10<sup>-11</sup> m/s、I0 : 1.91 × 10<sup>-12</sup> m/s）。興味深いことに、反応層の厚みは透水係数と比例関係にある。岩相全体で考えたときには反応の進行に岩石の透水係数のような物理的パラメータが強く影響することが確認できた。

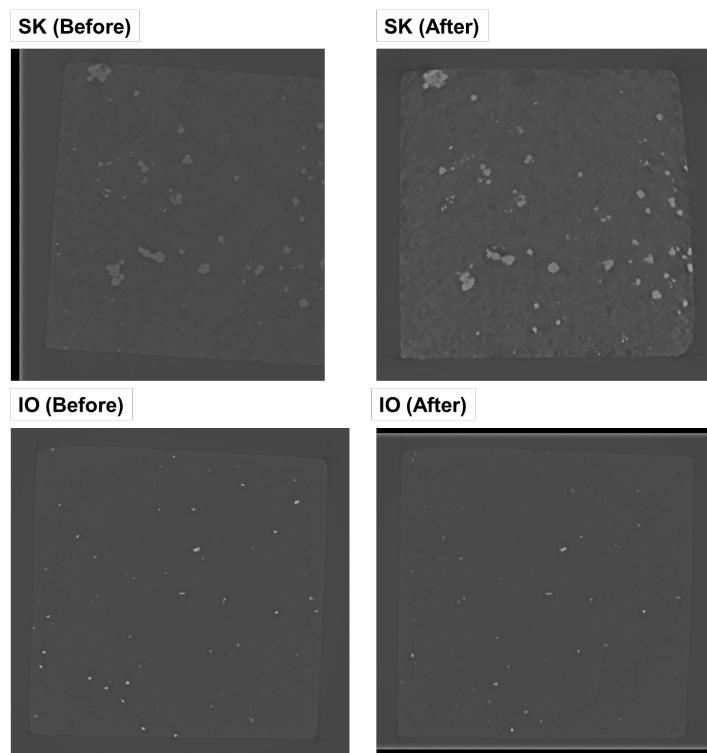


図6 反応前後におけるX線CT画像の一例

## 同一断面における比較

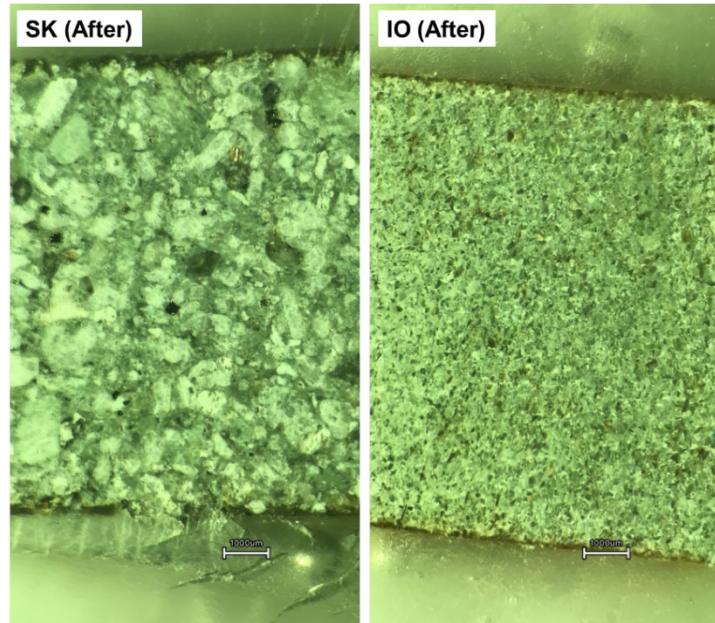


図7 SKおよびIOキューブ試料の反応後断面写真  
上下の茶褐色部分が反応進行層

 $\text{CO}_2$ 鉱物固定ポテンシャルを評価するためのモデル

一連の試験より、岩石全体での $\text{CO}_2$ 鉱物固定ポテンシャルは斜長石や輝石といった、火成岩中に初期的に含まれる主要造岩鉱物がどの程度残っているかが重要であることが明らかになった。試料を粒子として仮定できる場合、その速度は斜長石や輝石といった鉱物の含有量と各鉱物の平均粒子径によって算出することが可能である。平均粒子径は、図8に示すような顕微鏡観察から求めることが出来る。

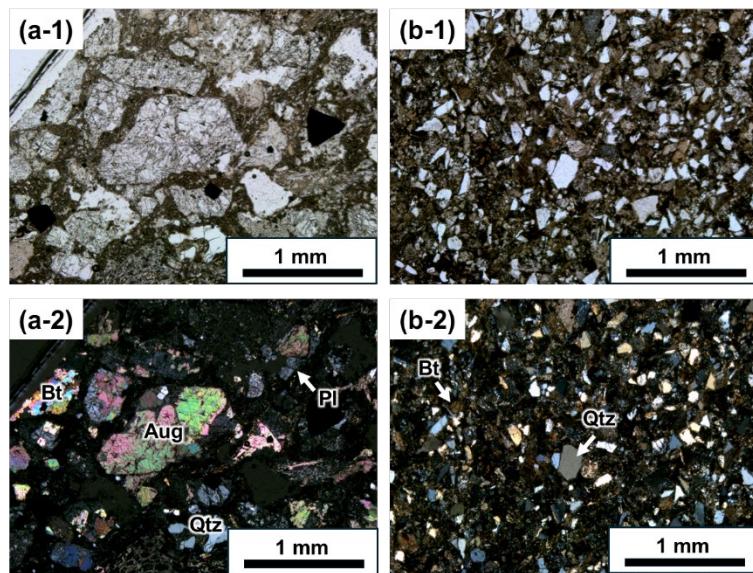


図8 SK、IO、HT試料の顕微鏡写真

(a-1) PPL (Plane Polarized Light) for SK, (a-2) XPL (Crossed polarized light) for SK, (b-1) PPL for IO, (b-2) XPL for IO. Qtz: 石英, Aug: 普通輝石, Pl: 斜長石, and Bt: 黒雲母.

図8より、各試料で構成鉱物の平均粒子径が全く異なることが分かる。例えば、SKでは輝石が概ね500–1000  $\mu\text{m}$ 程度、斜長石は300  $\mu\text{m}$ の平均粒子径を示した。これに対して、IOでは、いずれの鉱物も50–100  $\mu\text{m}$ 程度の粒子径を示す。粒子径と反応比表面積は反比例の関係性となるため、IOに含まれる斜長石は量的に少ないが初期的に比較的多くのCa溶出が達成されたものと考えられる。それぞれの鉱物の反応速度定数はPalandri and Kharaka (2001) などによるコンパイルデータから、任意の温度やpH条件等に対して算出することが可能である。150°Cの温度、5.5のpH条件においては、普通輝石の溶解速度定数は斜長石の溶解速度定数よりも大きく

なるため、特に輝石の含有量が重要であることが分かる。厳密には、各鉱物の組成によっても溶解速度定数は変化するため、それぞれの鉱物組成を詳細分析によって明らかにすることで、速度論的な観点からのCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを算出することが可能となる。

以下に、今回の検討より検討される単位岩石質量あたりのCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルの簡易的な算出法を示す。なお、固定ポテンシャルは絶対量および速度の観点から分けて示す。CO<sub>2</sub>鉱物固定に寄与するのはCaとMgの2元素とした。

#### CO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルの絶対量

$$\sum_i (Ca_i \times M_i + Mg_i \times M_i)$$

Ca<sub>i</sub>: i成分中のCa濃度

Mg<sub>i</sub>: i成分中のMg濃度

M<sub>i</sub>: 岩石単位質量あたりのi成分量

i : 対象となる構成鉱物(斜長石、輝石、橄欖石、角閃石)

#### CO<sub>2</sub>鉱物固定の速度

$$\sum_i (Ca_i \times M_i(t) \times A_i(t) \times k_i(t) + Mg_i \times M_i(t) \times A_i(t) \times k_i(t))$$

Ca<sub>i</sub>: i成分中のCa濃度

Mg<sub>i</sub>: i成分中のMg濃度

M<sub>i</sub>(t): 時刻tにおける岩石単位質量あたりのi成分量

A<sub>i</sub>(t): 時刻tにおけるi成分の反応比表面積

k<sub>i</sub>(t): 時刻tにおけるi成分の反応速度定数

i : 対象となる構成鉱物(斜長石、輝石、橄欖石、角閃石)

なお、初期の反応比表面積は各鉱物の平均粒子径より求まる幾何学的比表面積に適切な形状係数をかけ合わせることで得られるが、この形状係数は実際の試験データより算出する必要がある。また、時刻tにおける反応比表面積は、反応進行率(各鉱物の溶解割合)に従って初期比表面積の減少を仮定(粒子径が小さくなる)することで計算可能である。

一方で、実際の岩石層における反応では、キューブ試験で確認されたように徐々に内部へと反応が進行し反応領域が拡大していくと考えられる。そこで実際の岩相をターゲットとする場合には、上記の固定ポテンシャル推計式に、時刻tにおける総反応領域をかけ合わせる必要がある。反応領域については、基本的には透水係数に比例する形で広がっていくこと想定される。実際の岩相では液体の流れが集中するクラックなどの影響もあるが、岩石内部への反応進行することで反応領域が3次元的に拡大することから、本節で提示した通り、透水係数に従って広がる反応領域を仮定することである程度正確にCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを算出することが可能になると考えられる。

#### まとめとグリーンタフ地域における貯留候補地

本研究では、日本列島の広い領域で確認されるグリーンタフ質岩石を対象に、特にその変質の程度がCO<sub>2</sub>の鉱物固定ポテンシャルに与える影響を議論した。グリーンタフ分布域から複数の試料を採取し、粉末化した試料を用いてCO<sub>2</sub>-水-岩石反応試験を実施した。この結果、北海道より採取された然別川層群のグリーンタフ試料(SK)は、2週間で岩石1kgあたり11g以上という極めて高いCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを示した。これに対して、新潟や富山、北海道函館近郊から採取された試料のCO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルは高くなく、特に新潟県で採取された非常に変質の程度の激しいサンプル(FT)は、固体側におけるCO<sub>2</sub>固定を確認することが出来なかった。鉱物学的な整理から、グリーンタフ質岩石が一般的に被っている海底面付近における熱水変質作用と、これに伴う鉱物組成の変化は、CO<sub>2</sub>の鉱物固定ポテンシャルを著しく損なうことが明らかになった。また、SK試料を用いた試験で確認されたように、初期的に岩石中に含まれる炭酸塩鉱物が反応系内(反応溶液中)の炭酸塩鉱物飽和度を効果的に上昇させるため、ケイ酸塩鉱物の溶解に伴う炭酸塩鉱物化とその沈澱がスムーズに進行する可能性が示唆された。

さらに、キューブ型試料を用いた試験では、岩石の透水係数に比例する速度で、岩石内部に反応が進行していく様子が確認された。このことから、ある岩体を対象としたCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルは、岩石中に残存する斜長石、輝石、橄欖石、角閃石などの量とその反応比表面積、CO<sub>2</sub>共存下における各種鉱物の溶解速度、そして浸透とともに反応領域の拡大を考慮することで、固定の絶対量および速度を定量的に予測できることを示した。

最後に、一連の結論から、本研究ではグリーンタフ地域から2カ所の貯留候補地を示す。一か所目は、本研

究でもサンプルを採取した然別川層のグリーンタフ層である。本研究でも高い反応性とCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを示した。次に、島根半島に分布する牛切層および成相寺層である。牛切層はTakaya et al. (2015)により、普通輝石や斜長石が岩石中に相当量残存していることが示されているほか、方解石が初期的に含まれており、然別川層と産状が似通っている。CO<sub>2</sub>地中貯留の実施に向けては、これらの岩相が海底下でその程度の広がりや厚みを持ち、実際にどの程度の貯留ポテンシャルを有するか、物理探査やボーリング調査によって明らかにしていくことが求められる。

## 参考文献

- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2): A computer program for speciation, reaction-path, 1D-transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 pp.
- Takaya, Y., Nakamura, K., Kato, Y., 2015. Dissolution of altered tuffaceous rocks under conditions relevant for CO<sub>2</sub> storage. Applied Geochemistry 58, 78-87. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.03.002

### 1. 5. 研究成果及び自己評価

#### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

##### <得られた研究成果の学術的意義>

当研究課題では、国内におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の最適地としてグリーンタフ岩相を選定したうえで、様々にあるグリーンタフ質岩石の中でも、CO<sub>2</sub>を炭酸塩鉱物として固定するという観点からはどの岩相が有望かを実験的に検証した。この結果、グリーンタフに共通して観察される熱水変質作用は、CO<sub>2</sub>鉱物固定ポテンシャルを大きく低減させることができた。この結果から、岩相の化学組成としてCaやMg等のCO<sub>2</sub>と炭酸塩鉱物を形成する元素を多くすることはもちろんあるが、変質の影響が少なく、斜長石や輝石などの主要造岩鉱物を多く残す岩石ほどCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルが高くなることが明らかになり、これを貯留層候補選定の重要な指標として提示した。本研究は、グリーンタフ質岩石を対象として、そのCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを化学組成と変質程度、透水係数の3パラメータによりある程度正確に予測できることを明らかにした点において、非常に実践的な研究成果となっている。

また、この成果は国内におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の候補地選定に対する重要な指標を提供することとなり、現在までに複数社の民間企業と実証レベルへの移行を目指す共同研究に発展していることから、極めて発展性の高い研究成果であったと言える。

##### <環境政策等へ既に貢献した研究成果>

特に記載する事項はない。

##### <環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

本研究は、国内におけるCO<sub>2</sub>地中貯留候補地選定に向けた指標を提示している点、グリーンタフ質岩石について具体的な貯留候補岩相に言及している点において、直接的に環境行政（カーボンニュートラル社会の実現に向けた対策）への貢献が見込まれる内容となっている。現時点において、環境政策への活用は無いが、今後国内においてCO<sub>2</sub>地中貯留の大規模な実施に向けてその中心的な役割を担う民間企業との共同研究に本研究成果を繋げられている。CO<sub>2</sub>地中貯留の実際のプレイヤーとなる民間企業と、実証レベルへの移行を目指す研究を開始できていることから、環境政策への貢献は今後さらに大きくなると期待される。

#### 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

##### <全体達成状況の自己評価> · · · · ·

##### 2. 目標を上回る成果をあげた

「グリーンタフ地域におけるCO<sub>2</sub>地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究」（東京大学、高谷 雄太郎）

全体目標	全体達成状況
<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリーンタフ質岩石の化学組成・鉱物組成をパラメータとし、一意にCO<sub>2</sub>固定ポテンシャル（鉱物化速度と上限量）が定まるモデルを構築する。</li> <li>・CO<sub>2</sub>固定ポテンシャル、貯留性、経済性の総合的</li> </ul>	<p>研究内容の詳細はサブテーマ1に記載する。各目標に対する達成状況は以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・CO<sub>2</sub>固定ポテンシャル（鉱物化速度と上限量）が定まるモデルを構築</li> </ul>

<p>な観点から、グリーンタフ地域における貯留候補地の選定・優先順位付けを実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・プレスリリースなどを通して、候補地に関する情報を作り広く公開し、その周知を図る。</li> </ul>	<p>⇒当初想定していた通りのモデルを作成することが出来た</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・グリーンタフ地域における貯留候補地の選定・優先順位付けを実施</li> </ul> <p>⇒<u>北海道西部定山渓近傍および島根県島根半島などに分布するグリーンタフ層を有望な貯留候補地を選定</u>。同時に、変質が強く粘土鉱物や沸石類が多く生成している岩相は、CO<sub>2</sub>を鉱物として固定するポテンシャルは低いことを実証（新潟県のグリーンタフなどがこれに相当）。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・候補地に関する情報を広く公開し、その周知を図る</li> </ul> <p>⇒<u>雑誌への掲載やマスメディアへの出演を通して、グリーンタフ層におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の優位性を広く周知することが出来た</u>。また、本成果を端緒として、<u>民間企業2社とCO<sub>2</sub>地中貯留最適地選定に関する共同研究を、1社と特定の岩相を対象としたCO<sub>2</sub>固定ポтенシャル推定に関する共同研究を開始しており、研究を実証レベルに移行することが出来たため目標を上回る成果になったと判断した。</u></p>
--	---

## &lt;サブテーマ1達成状況の自己評価&gt; · · · · · 2. 目標を上回る成果をあげた

「グリーンタフ地域におけるCO<sub>2</sub>地中貯留候補地の選定に向けた実践的研究」（東京大学、高谷雄太郎）

サブテーマ1目標	サブテーマ1達成状況
<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリーンタフ質岩石の化学組成・鉱物組成をパラメータとし、一意にCO<sub>2</sub>固定ポテンシャル（鉱物化速度と上限量）が定まるモデルを構築する。</li> <li>・CO<sub>2</sub>固定ポテンシャル、貯留性、経済性の総合的な観点から、グリーンタフ地域における貯留候補地の選定・優先順位付けを実施する。</li> <li>・プレスリリースなどを通して、候補地に関する情報を広く公開し、その周知を図る。</li> </ul>	<p>複数地点より採取されたグリーンタフ質岩石を用いたCO<sub>2</sub>-水-岩石反応実験を実施し、グリーンタフ質岩石に普遍的に観察される熱水変質作用が、岩石のCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルに及ぼす影響を検討した。この結果、海底における熱水変質作用は岩石のCO<sub>2</sub>固定ポテンシャルを著しく低下させること、緑泥石などの生成が岩相の透水率を低下させることが明らかになった。</p> <p>CO<sub>2</sub>の固定効率には初期造岩鉱物である斜長石や輝石がどれだけ残存しているかでほとんど決まるところを明らかにし、これによりCO<sub>2</sub>鉱物ポテンシャルを予測できることを示した。</p> <p>安山岩質～玄武岩質でかつ、熱水変質の程度の少ない岩相が最適な貯留層であると結論付けた。具体的には、北海道西部定山渓近傍および島根県島根半島などに分布するグリーンタフ層が有望な貯留層となることが期待されると判断できた。</p> <p>雑誌への掲載やマスメディアへの出演を通して、グリーンタフ層におけるCO<sub>2</sub>地中貯留の優位性を広く周知することが出来た。さらに、民間企業との共同研究という形で、研究を実証ステージに進めることができた。</p>

## 1. 6. 研究成果発表状況の概要

## 1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	0
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	1
口頭発表・ポスター発表	6
マスコミ等への公表・報道等	4
成果による受賞	1
その他の成果発表	0

### 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」から10件まで抜粋)
1	高谷雄太郎、小手川鑑. 実験的アプローチによるグリーンタフ質岩石のCO <sub>2</sub> 鉱物固定ポテンシャルの推定. 資源・素材2023（松山）[3101-11-04]
2	高谷雄太郎. CO <sub>2</sub> を鉱物として固定する - CO <sub>2</sub> 地中貯留とMCT - 化学・材料インキュベーション研究会.
3	高谷雄太郎. グリーンタフ地域におけるCO <sub>2</sub> 地中貯留の検討. 資源地質学会年会講演会 [S-05]
4	Yutaro Takaya, Geological storage of CO <sub>2</sub> in Green Tuff Region in Japan, エネルギー転換・重要鉱物・サーキュラーエコノミーに関する日豪シンポジウム2024
5	Yutaro Takaya, CO <sub>2</sub> fixation as carbonate minerals - CO <sub>2</sub> geological storage and mineral carbonation technology -, EARTH (The 17 <sup>th</sup> International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology). Nov. 3, 2024 ※Keynote Speak (基調講演)
6	Wako Kobayashi, Chiharu Tokoro and Yutaro Takaya, A study on reaction characteristics of Green Tuff rocks for selecting optimal CO <sub>2</sub> storage locations in Japan, Goldschmidt 2025 Conference.
8	日経サイエンス 「特集：地球史解読がもたらした海底資源 日本海の海底岩石層にCO <sub>2</sub> を閉じ込める」 2022年11月号
9	別冊日経サイエンス 「気候危機と戦う 人類を救うテクノロジー」 2023年8月発行
10	居間からサイエンス #29 BSテレ東 2023年11月22日放送

11	テレビ東京「ニッポン未来エネルギー応援団」2025年6月5日放送
----	----------------------------------

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

### 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動は、合計で3件行った。そのうち、特に重要なもののとしては、成果番号11番の「居間からサイエンス #29 BSテレ東 2023年11月22日放送」への出演である。本番組の29回目放送において、グリーンタフ岩相へのCO<sub>2</sub>地中貯留に関して、着目したきっかけからその有効性の検証までを約1時間に亘って放送いただいた。CO<sub>2</sub>地中貯留の大規模な実施に向けては、正しく安全性が検証されているという点を広く周知することが最も重要であると考えいるため、テレビ番組を通して丁寧にグリーンタフ岩相へのCO<sub>2</sub>貯留を説明できる機会を持てたことは非常に有用であった。

また、2025年にも、グリーンタフ層を主題としたCO<sub>2</sub>地中貯留に関する内容で、テレビ東京「ニッポン未来エネルギー応援団」（2025年6月5日放送）に出演した。

### 1. 7. 国際共同研究等の状況

国際共同研究を実施していない。

### 1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
高谷雄太郎	研究代表者及びサブテーマリーダー 東京大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 産業技術総合研究所・産総研特別研究員、東京大学・特任研究員、JSPS特別研究員（PD）、早稲田大学助教・講師（任期付）、研究院准教授を経て、現在、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻准教授 Resource Geology、Minerals編集委員 専門は資源処理工学、地球化学 受賞歴：エスペック環境研究奨励賞、資源地質学会研究奨励賞、資源・素材学会 奨励賞

## 2. 研究成果発表の一覧

### (1) 産業財産権

特に記載する事項はない。

### (2) 論文

#### <論文>

特に記載する事項はない。

### (3) 著書

#### <著書>

特に記載する事項はない。

### (4) 口頭発表・ポスター発表

#### <口頭発表・ポスター発表>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2023	高谷雄太郎、小手川鑑. 実験的アプローチによるグリーンタフ質岩石のCO <sub>2</sub> 鉱物固定ポテンシャルの推定. 資源・素材2023（松山）[3101-11-04]	1	有
2	2024	高谷雄太郎. CO <sub>2</sub> を鉱物として固定する - CO <sub>2</sub> 地中貯留とMCT - 化学・材料インキュベーション研究会.	1	無
3	2024	高谷雄太郎. グリーンタフ地域におけるCO <sub>2</sub> 地中貯留の検討. 資源地質学会年会講演会 [S-05]	1	無
4	2024	Yutaro Takaya, Geological storage of CO <sub>2</sub> in Green Tuff Region in Japan, エネルギー転換・重要鉱物・サーキュラーエコノミーに関する日豪シンポジウム2024	1	無
5	2024	Yutaro Takaya, CO <sub>2</sub> fixation as carbonate minerals - CO <sub>2</sub> geological storage and mineral carbonation technology -, EARTH (The 17 <sup>th</sup> International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology). Nov. 3, 2024 ※Keynote Speak (基調講演)	1	無
6	2025	Wako Kobayashi, Chiharu Tokoro and Yutaro Takaya, A study on reaction characteristics of Green Tuff rocks for selecting optimal CO <sub>2</sub> storage locations in Japan, Goldschmidt 2025 Conference.	1	有

### (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
7	2024	東京大学「ご家族のためのオープンキャンパス2024」2024年5月11日 東京大学大学院工学系研究科システム創成専攻 テーマL4：二酸化炭素の鉱物固定に関する講義・見学	1

### (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
8	2022	日経サイエンス 「特集：地球史解読がもたらした海底資源 日本海の海底岩石層にCO <sub>2</sub> を閉じ込める」 2022年11月号	1

9	2023	別冊日経サイエンス「気候危機と戦う 人類を救うテクノロジー」 2023年8月発行	1
10	2023	居間からサイエンス #29 BSテレ東 2023年11月22日放送	1
11	2025	テレビ東京「ニッポン未来エネルギー応援団」2025年6月5日放送	1

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
12	2023	2023年度第49回資源素材学会奨励賞. (2024年3月) 高谷雄太郎 「CO <sub>2</sub> の鉱物固定化技術に関する研究とその新しい展開」	1

## (8) その他の成果発表

特に記載する事項はない。

## 権利表示・義務記載

特に記載する事項はない。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に代表者又は分担者として参画した研究者にあります。  
 この研究成果報告書の著作権は、引用部分及び独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）のロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。  
 ERCAは、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title : Practical Research for the Site Selection of CCS in Green Tuff Region

Project Number : JPMEERF2022R02

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Takaya Yutaro

(PI ORCID) : ORCID0000-0003-4046-6780

Principal Institution : Department of Systems Innovation, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
Tokyo, Japan  
Tel: +81-3-5841-0820  
E-mail: y-takaya@sys.t.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by :

Keywords : Geological CO<sub>2</sub> storage, CO<sub>2</sub> mineral trapping, Green Tuff, Water–rock interaction experiment

**[Abstract]**

In this study, potential sites for geological CO<sub>2</sub> storage in Japan were evaluated, with a specific focus on the Green Tuff region. Green Tuff refers to tuffaceous rocks formed through submarine hydrothermal activity during the formation of the Japan Sea, characterized by their green coloration resulting from hydrothermal alteration. Some of these rocks exhibit basaltic or andesitic compositions and are enriched in calcium and magnesium, making them favorable candidates for mineral carbonation via reactions with injected CO<sub>2</sub> to form stable carbonate minerals.

However, Green Tuff encompasses a broad range of lithologies that vary significantly in chemical and mineralogical composition depending on their age and the extent of alteration. Therefore, it is essential to elucidate how such compositional differences influence the CO<sub>2</sub> mineral trapping potential. To address this, Green Tuff rocks with diverse chemical and mineralogical characteristics were collected from several regions and subjected to CO<sub>2</sub>–water–rock interaction experiments to identify the primary factors controlling their capacity for CO<sub>2</sub> mineral trapping.

Field investigations and sampling were conducted, followed by detailed petrographic and geochemical analyses. CO<sub>2</sub>–water–rock reaction experiments were performed using both powdered and cube-shaped samples to assess parameters such as CO<sub>2</sub> fixation rates. The experimental results demonstrated that hydrothermal alteration, which defines “Green Tuff”, significantly reduces its capacity for mineral trapping of CO<sub>2</sub>. Specifically, a lower degree of alteration and the preservation of primary rock-forming minerals such as plagioclase and pyroxene were found to be critical for CO<sub>2</sub> mineral fixation. In contrast, alteration minerals such as clay minerals and zeolites contributed minimally to CO<sub>2</sub> fixation.

Based on these findings, andesitic rock formations with low degrees of hydrothermal alteration—such as those found in the Shikaribetsugawa Formation in western Hokkaido and the Ushikiri and Jōzōji formations on the Shimane Peninsula—are identified as promising candidates for CO<sub>2</sub> storage sites within the Green Tuff region.

Reference: Yutato Takaya, Wako Kobayashi, Mitsuki Ogasawara, The effect of hydrothermal alteration of tuffaceous rock on CO<sub>2</sub> mineral trapping potential, Applied Geochemistry. (submitted)

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20222R02) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.