

再生可能エネルギー導入のための圧縮空気貯蔵技術について

末永 弘^{1*}・田中 姿郎¹・伊藤 由紀¹・窪田 健二¹・野原 慎太郎¹・木村 治夫¹

¹電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6)

*E-mail: suenaga@criepi.denken.or.jp

再生可能エネルギーの出力変動の制御あるいは送電線への安定供給のためには、エネルギー貯蔵技術を開発し、導入する必要がある。現在はNaS電池やLiイオン電池などが適用されているが、大規模導入時にはコストや製造・廃棄時の環境負荷の低減が重要な課題となると考えられる。このため、本研究ではエネルギー貯蔵技術として圧縮空気貯蔵を取り上げ、立地条件や課題について調査した。その結果、休廃止鉱山の空洞、枯渇油ガス田、堆積平野の地下の帯水層が圧縮空気貯蔵に利用可能であることを示した。また、圧縮空気貯蔵の課題として、貯蔵箇所の事前適性評価、地層の黄鉄鉱分の評価、貯蔵時の地層の目詰まり対策、物理探査手法の現場への適用性評価が必要であることを示した。

Key Words : Renewable Energy, Compressed Air, Energy Storage, Underground Storage

1. はじめに

我が国における長期的視点に立った電力供給は、地球温暖化防止の観点からも、再生可能エネルギーを積極的に導入することにより、化石燃料への依存度を低下させる必要があると考えられる¹⁾。しかしながら、風力発電や太陽光発電は間欠性の電源であり、再生可能エネルギーの導入量に応じて、将来、送電線の整備など、様々な対策が必要となってくる。

また、風力発電や太陽光発電は出力変動が大きいため、直接電力系統へ接続することが困難であり、バッファとしての蓄電技術が必要となる²⁾。当面の対応策として、ナトリウム-硫黄電池³⁾ (NaS電池)、リチウムイオン電池⁴⁾ (Liイオン電池)などのバッテリー技術が考えられるが、高コストであることや、生産・廃棄時における環境への負荷が課題となるものと考えられる。このため、導入から運用までのコストを低減した、環境への負荷が小さいエネルギー貯蔵技術がキーテクノロジーになると考えられる⁵⁾。

環境への負荷が小さく、コスト優位性を持つ可能性のあるエネルギー貯蔵技術として、揚水発電や圧縮空気貯蔵が挙げられる。本研究では、今後導入が望まれる、土木技術を活用したエネルギー貯蔵技術として、圧縮空気貯蔵を取り上げ、再生可能エネルギーの安定供給に対応した貯蔵方策、ならびに導入に際しての技術的課題につ

いて検討した。本稿ではこの検討の結果について述べる。

2. 圧縮空気貯蔵技術に関する既往研究

従来検討されてきた圧縮空気貯蔵技術は、圧縮空気を夜間などの安価な電力で貯め、電力需要の大きい時間帯に発電に利用することにより、同じガスタービンで発電容量を増大させる効果と電力の貯蔵効果を生むものである⁶⁾。この方式は圧縮空気貯蔵(Compressed Air Energy Storage)ガスタービン発電システムと呼ばれ、CAES-G/T発電システムと略称される。

CAES-G/T発電は新しい技術ではなく、1970年代より開発、実用化されている技術である。まず1979年にドイツで最大出力290MWのフントルフ発電所が運転開始され、1991年にはアメリカで最大出力110MWのマッキントッシュ発電所が運転開始されている⁷⁾。両発電所では地下の岩塩中に掘削した空洞を圧縮空気の貯蔵に利用している。フントルフ発電所では地下深度約650m~820mに、最大直径約60mで、容量約15万m³の空洞2基を掘削し、4.8MPaから6.8MPaの範囲で利用している。

岩塩層では気密性に優れた空洞が、安全かつ安価に建設できるが、わが国には岩塩層がない。そこで従来の掘削技術によるトンネル内面に気密性のライニングを用いた方法や、地下水圧で圧縮空気を閉じ込める水封式など

が提案されている。

1990年～2001年には通商産業省（現経済産業省）のプロジェクトで北海道空知郡上砂川町において、ライニング方式による貯蔵空洞を用いた出力2,000kWの実証運転が行われた⁸⁾。また、岐阜県の神岡鉱山では水封式の空洞の実証が行われた⁹⁾。

CAES-G/T発電の導入コストについては、我が国を対象とした1990年代の調査では、揚水発電、圧縮空気貯蔵共に、発電部分にかかる建設コストは14万円/kW、貯蔵部分にかかる建設コストは、揚水発電は1万円/kWh、圧縮空気貯蔵では技術進歩を見込んだ商用化時のコストとして0.5～1.5万円/kWhとされている¹⁰⁾。

また、表-1に示すように、米国における近年の調査によると、1000～1250ドル/kW、1ドル100円とすると、10～12.5万円/kWとされている。これは、発電量の大きい揚水発電よりも低コストであると算出されており、他の電力貯蔵技術よりも低コストとなる²⁾。

表-1 電力貯蔵導入のコスト比較²⁾

貯蔵方式	発電量(MW)	導入コスト(\$kW)
揚水発電	280～1400	1500～4300
圧縮空気貯蔵	135	1000～1250
NaS 電池	50	3100～3300
高度鉛蓄電池	100	2700
バナジウム Redox	50	3100～3700
亜鉛-臭素 Redox	50	1450～1750

3. 再生可能エネルギー安定供給のための圧縮空気貯蔵技術

既往のCAES-G/T発電は、電力需要のピークシェーピングのために導入された技術であった。これに対して、再生可能エネルギーのうち風力発電と太陽光発電の導入に伴うシステムの安定的な運用の必要性が増大している。このことから、再生可能エネルギーの安定供給に寄与することを目的とした圧縮空気貯蔵技術について検討を行った⁵⁾。

(1) 我が国における立地条件

本研究においては、圧縮空気を地下に貯蔵する対象として、1) 電力の消費地と離れている地下に存在する油ガス田、2) 電力の大消費地となる大都市の地下に存在する帯水層、3) 山間部の休廃止鉱山跡の空洞を考えた。

a) 枯渇油・ガス田

図-1に、我が国に存在する枯渇油・ガス田を対象とした圧縮空気貯蔵システムの概念図を示す。油やガスが天然に貯留するメカニズムとしては、地層における流体の透過しやすさ（浸透率）の違いにより、流体がトラップされることによる。多くの油・ガス田のトラップ構造は、背斜構造と呼ばれる、水平に堆積した地層が造山運動に従って褶曲することによりできる地質構造であり、世界

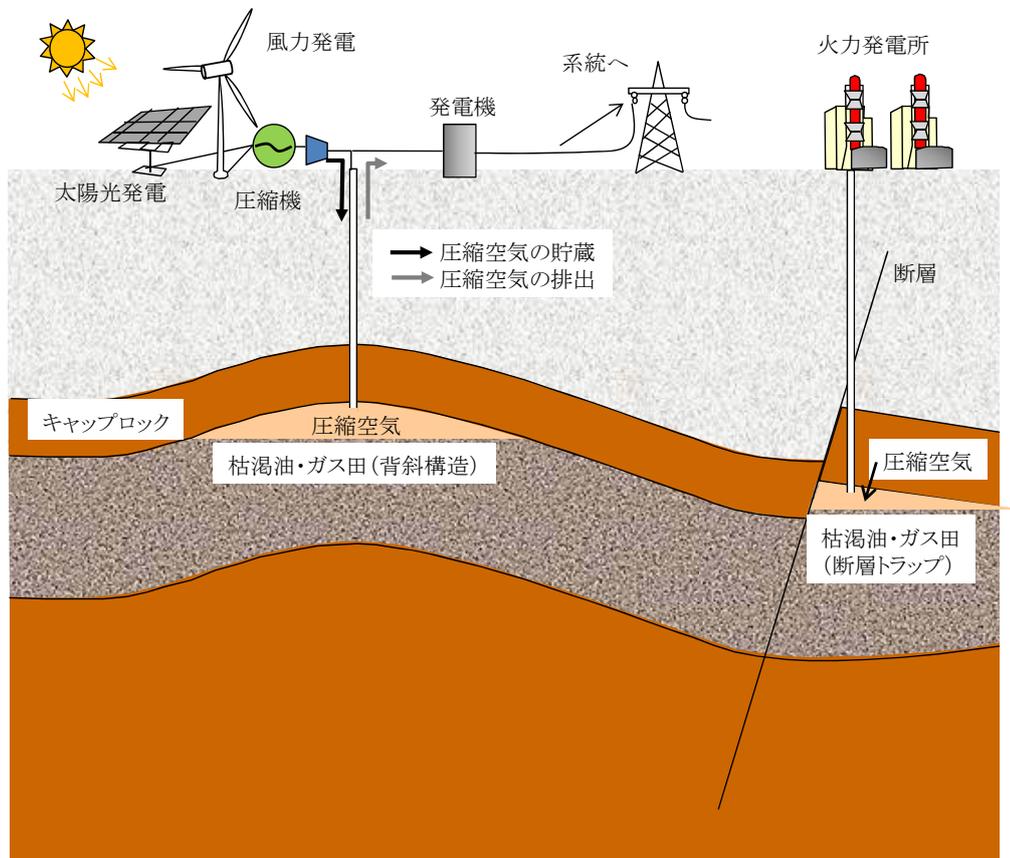


図-1 枯渇油ガス田を対象とした時の再生可能エネルギー安定供給のための圧縮空気貯蔵システム（概念図）

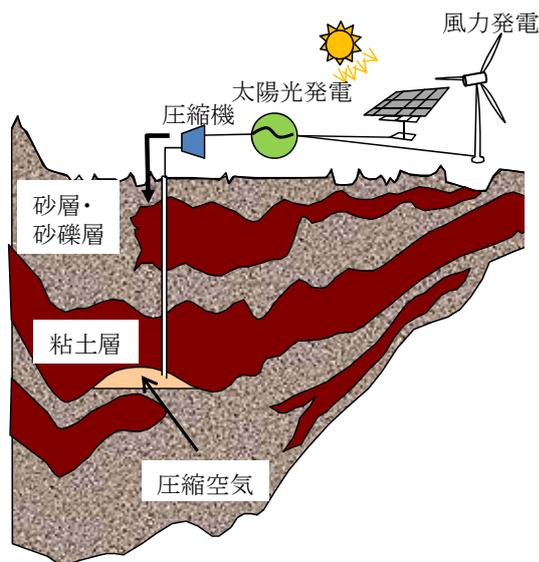


図-2 帯水層を利用した圧縮空気貯蔵システム（概念図）

の主要油田のトラップのうち、80%は背斜トラップである¹¹⁾。このほか、我が国では断層が多く存在しており、断層に伴う地層のずれからトラップ構造ができる例も図に示した。

これらの枯渇油・ガス田は、我が国では日本海側に多く分布し、電力の大消費地から離れているが、北海道などでは広大な土地に太陽光発電が建設されている例が多く、日本海側の一部の地域では風力発電の好立地条件を持つことから、これらを対象とした場合の安定供給のために圧縮空気貯蔵システムを利用することが想定できる。

b) 堆積平野における帯水層

図-2では、我が国の電力の大消費地である、東京湾、伊勢湾、大阪湾などの河川により形成された堆積平野が分布する地域を対象とした圧縮空気貯蔵システムの概念図を示す。これらの地域では、更新世～新第三紀に厚い砂礫・粘土の互層が形成されており¹²⁾、図に示すように粘土層がキャップロックになる構造が存在する場合には圧縮空気を貯蔵できる可能性がある。帯水層の中で、圧縮空気の貯蔵可能な箇所を探索し、この位置にボーリング孔を掘削し、必要に応じて地下に圧縮空気を注入することにより、貯蔵できるものと考えられる。この帯水層近傍に太陽光・風力発電設備を配置することにより、圧縮空気貯蔵システムを運用することが可能である。

c) 休廃止鉱山

図-3に休廃止鉱山を利用した圧縮空気貯蔵システムの概念図を示す。これは、石炭や金属鉱山のうち、現在廃坑となっている鉱山の坑道を利用して空洞を建設し、ここに圧縮空気を貯蔵するものである。坑道は既に存在す

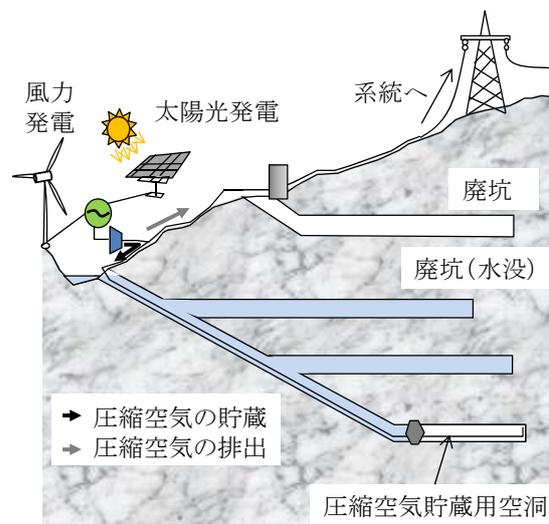


図-3 休廃止鉱山を利用した圧縮空気貯蔵システム（概念図）

るため、掘削に伴うコストは発生せず、新たな建設は地上までの配管や空洞を密閉するためのプラグのみとなることから、建設コストを大幅に低減できるものと考えられる。また、我が国には多くの休廃止鉱山が存在しており、対象となる候補は多く、適用範囲は広いものと考えられる。多くの鉱山は山間部に位置しており、電力の供給地や消費地と離れている場合が多い。しかしながら、山間部においても風力発電に適した地域は存在することから、再生可能エネルギーの安定供給のために利用されることが想定される。

(2) 我が国における立地可能性

わが国における深部地層への流体の圧入に関しては、天然ガスの地下貯蔵、資源開発における増進回収（EOR、EGR）、増進回収の技術を応用したCO₂地中貯留の実証試験などが検討・実施されてきた。これらの事例を参考に、圧縮空気貯蔵の立地可能性を述べる。また、我が国における稼働中あるいは休廃止となった鉱山（金属、石炭）の跡地利用として圧縮空気貯蔵が適用可能であれば大きな波及効果が期待されるため、既存鉱山を利用した圧縮空気貯蔵の立地可能性についても述べる。

a) 枯渇油・ガス田

枯渇ガス田は生産性の低下により採ガスが放棄されたガス田であり、地下深部にガスを長期間貯蔵していた実績があるため、天然ガスの大規模な貯蔵庫として世界各国で利用されていることから、圧縮空気貯蔵への適応性も高いことが期待される。国内の油ガス田は、新潟、秋田、北海道などの新第三系堆積盆を中心に分布しており、枯渇油ガス田も同様な分布を示す。

新たな地下貯蔵の適地については天然ガス地下貯蔵シ

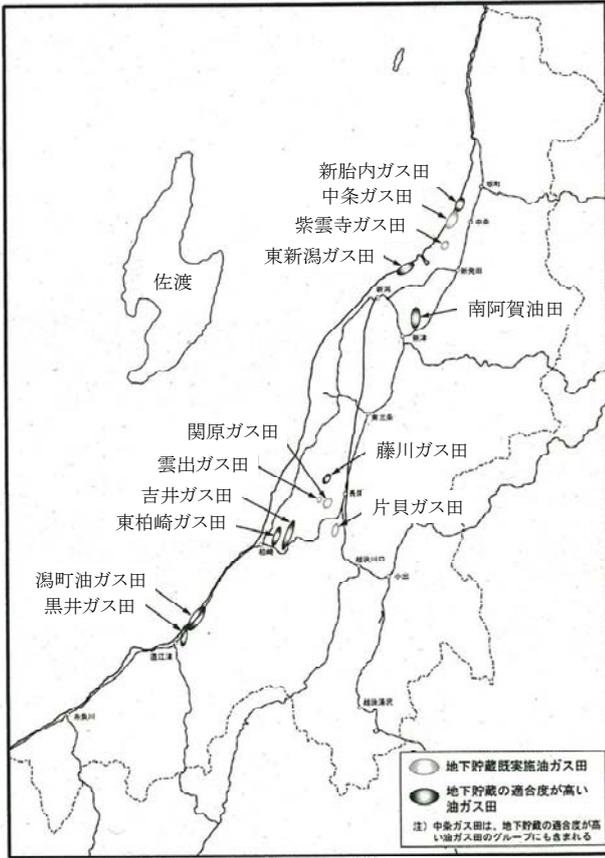


図-4 現在稼働している天然ガスの地下貯蔵サイトと地下貯蔵に有望な地点（文献¹³⁾に一部加筆）

STEM委員会により調査されており¹³⁾、地下貯蔵の適合度が高い油ガス田が抽出されている。これらも全て新潟県・秋田県に位置している（図-4）。また、背斜構造などのトラップ構造を有する構造的な帯水層は、財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）により実施された全国賦存量調査により分布が示されている¹⁴⁾。これらの構造的な帯水層は、圧入した空気の圧力を保持することが期待される。

b) 堆積平野における帯水層（関東・関西・中部）

わが国において、帯水層への天然ガス貯蔵の実績はない。一方、帯水層への流体の圧入は、大気へのCO₂排出量削減技術として期待される、CO₂地中貯留の観点で可能性が検討されている¹⁴⁾。石油・ガス資源に乏しいわが国においては、大規模排出源となる火力発電所の立地が堆積平野に集中していることから、堆積平野近傍の帯水層へのCO₂の貯留可能性が検討されてきた。RITEが実施した全国貯留層賦存量調査において実施された結果¹⁵⁾に基づく帯水層の分布を図-5に示す。図-5では、水溶性ガス田の分布範囲がB-1として、帯水層の分布範囲はB-2として示されている。ここで示された帯水層の分布は深度約800m以深まで堆積層が分布している層厚を示しており、実際には陸域のより広範囲に帯水層が分布している

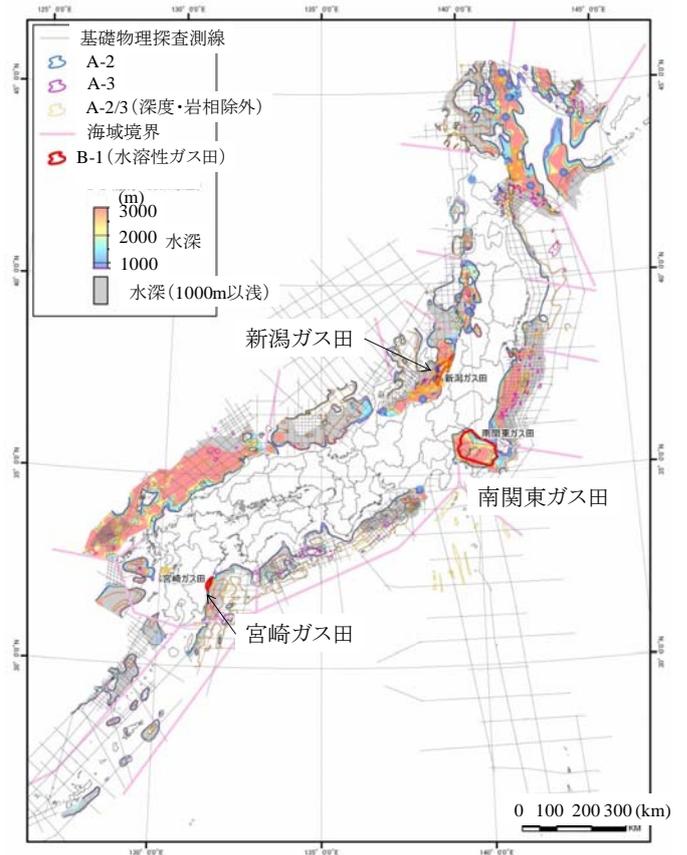


図-5 帯水層の分布（800m以深、文献¹⁵⁾に一部加筆）

と考えられる。北海道から新潟までの新第三系堆積盆と合わせて、電力消費地である東京湾周辺に堆積層が広く分布している。これは堆積層の厚さを示したものであり、その全てが貯留層にならないことに注意を要する。またRITEは、関東に次ぐ電力の大消費地である大阪湾周辺地域（大阪層群）と伊勢湾周辺地域にも新第三系～第四系の堆積層が地下深部まで分布していることも示している¹⁴⁾。

c) 休廃止鉱山

我が国ではこれまでは金属鉱床、炭田のあるところに数多くの鉱山が開発されてきたが、採掘の完了や採算が合わない等の理由から、数十年前より休止・廃止がなされてきている。このような休廃止鉱山は全国で5000～6000とも言われており¹⁶⁾、坑内水の廃水等に伴う環境汚染を防止する事業を継続する必要がある。休廃止鉱山の中には、坑道が現存し、一部を利用できる鉱山も存在すると考えられることから、これらの鉱山の坑道を圧縮空気貯蔵の空洞として利用できれば、坑道掘削の費用が発生しないほか、坑道の水理地質情報が事前に把握できているメリットも存在し、有利であると考えられる。

金属鉱業等公害対策特別措置法第4条に規定する、「特定施設に係る公害防止事業の基本方針」において対象となっている109の休廃止鉱山に、観光鉱山等で利用

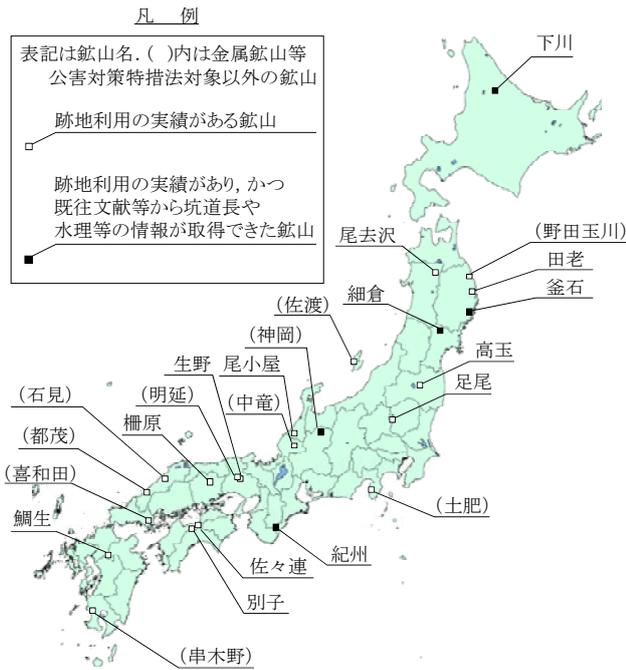


図-6 我が国において利用可能性のある休廃止鉱山⁹⁾

されている10鉱山（野田玉川、佐渡、土肥、神岡、中竜、明延、石見、都茂、喜和田、串木野）を加えた119鉱山の中で、跡地利用の実績のある鉱山を抽出した。また、その中で、既往文献を用いた簡易調査から、坑道長、水理状況等の情報が取得できた鉱山を抽出した⁹⁾。この結果を図-6に示す。この図から、我が国において利用可能な休廃止鉱山は24鉱山あるものと考えられる。しかしながら、抽出した鉱山における圧縮空気貯蔵の適用可能性については今後詳細に検討する必要がある。

(3) 圧縮空気貯蔵の技術的課題

まず圧縮空気貯蔵のコストに関しては、圧縮空気貯槽の構築コストを低減する技術開発などにより、貯蔵容量に対する設備費を低減することが必要である。また、圧縮空気貯蔵は発電と貯蔵の2つの機能をもつことから、発電効率や貯蔵効率といった評価が難しいため、導入による効果を明瞭にし、稼働率の高い運用方法を検討する必要があると考えられる。次に圧縮空気貯蔵技術の適用に際し、課題となる点を調査した。調査項目としては、貯蔵対象層やシール層、地層の酸化による化学的影響、出砂障害および間隙閉塞の影響、貯蔵流体のモニタリング方法、反射法地震探査による地質構造調査、とした⁹⁾。その結果、以下が明らかとなった。

- 1) 立地可能な帯水層、休廃止鉱山、枯渇油ガス田において、貯蔵箇所の適性および空気の遮蔽性能の評価が重要であること。
- 2) 空気中の酸素による地層の酸化を防止するため、黄

鉄鉱の多い地層は避ける必要があること。

3) 帯水層にボーリング孔を掘削する場合の土砂障害、帯水層に高圧の空気を注入する場合の細粒分の目詰まり・地層の不安定化を解消する技術開発が必要であること。

4) 空気の貯蔵可能領域の推定や貯蔵流体のモニタリングを行うためには、電気・電磁探査や地震探査といった物理探査が有効となる可能性があり、これらの手法について、現場への適用性を示す必要があること。

4. まとめ

再生可能エネルギーの出力変動の制御あるいは送電線への安定供給のためのエネルギー貯蔵技術として圧縮空気貯蔵技術を取り上げ、立地条件や課題について調査した。その結果、休廃止鉱山の空洞、枯渇油ガス田、堆積平野の地下の帯水層が圧縮空気貯蔵に利用可能であることが示された。また、圧縮空気貯蔵の課題として、貯蔵箇所の事前適性評価、地層の黄鉄鉱分の評価、貯蔵時の地層の目詰まり対策、物理探査手法の現場への適用性評価が必要であることを示した。

今後は、今回の調査結果をもとに、圧縮空気貯蔵システムの構築に向けて、概念設計ならびに立地可能性調査を行っていく。

参考文献

- 1) 経済産業省低炭素電力供給システムに関する研究会：低炭素電力供給システムの構築に向けて－低炭素電力供給システムに関する研究会報告書－，2009年7月，p.32，2009.
- 2) EPRI：Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits, 1020676, 2010.
- 3) 財団法人建築コスト管理システム研究所新技術調査検討会：NAS 電池について，建設コスト研究，pp. 70-73，2010.
- 4) 小久見善八：リチウム二次電池，オーム社，p.213，2008.
- 5) 末永弘，田中姿郎，伊藤由紀，窪田健二，野原慎太郎，木村治夫：再生可能エネルギー導入のための圧縮空気によるエネルギー貯蔵技術，電力中央研究所研究報告，N14004，2014.
- 6) 中川加明一郎：圧縮空気貯蔵ガスタービン発電，土と基礎，Vol.50，No.11，pp.3-5，2002.
- 7) Cavallo, A.：Controllable and affordable utility-scale electricity from intermittent wind resources and compressed air energy storage (CAES), *Energy*, 32, pp. 120-127, 2007.
- 8) 篠原俊彦，合田佳弘，川上博史：施工 地下 450m の岩盤中に高圧圧縮空気を貯蔵 北海道上砂川パイロットプラント工事，トンネルと地下，32(6)，pp.495-503，2001.

- 9) 中川加明一郎, 志田原巧, 池川洋二郎, 末永弘, 宮本由紀: 水封式圧縮空気貯蔵の実証—横坑での気密実験—, 電力中央研究所研究報告, U02050, 2003.
- 10) 内山洋司: 電力貯蔵設備の役割と展望, 第7回圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナーテキスト—CAES-G/T 発電の研究動向と地下空洞開発技術—, pp.27-39, 1997.
- 11) 石油技術協会: 石油工業便覧, 1983.
- 12) 山本荘毅: 地下水調査法, 古今書院, 1983.
- 13) 天然ガス地下貯蔵システム検討委員会(石油公団): 天然ガス地下貯蔵システム, 平成13年2月, 2001.
- 14) 財団法人地球環境産業技術研究機構: 平成17年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 1751p, 2005.
- 15) 財団法人地球環境産業技術研究機構: 平成20年度二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書, 472p, 2008.
- 16) 門木秀幸, 小坂千秋, 松本清次, 細井由彦: 休廃止鉱山の坑廃水処理過程からの金属回収と最終処分量の削減, 環境化学, vol. 17, No. 3, pp. 443-452, 2007.

A STUDY ON COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE FOR THE INSTALLATION OF RENEWABLE ENERGY

Hiroshi SUENAGA, Shiro TANAKA, Yuki ITO, Kenji KUBOTA, Shintaro NOHARA
and Haruo KIMURA

An energy storage technology is necessary to develop and install for stable supply of renewable energy. Nowadays a sodium-sulfur (NaS) or a lithium-ion (Li-ion) battery is applied as energy storage, though these technologies have problems of high cost and environmental load. A compressed air energy storage (CAES) technology was taken up in this study to investigate locational conditions and challenges. As a result, an aquifer below a depositional plain, a cavern of an abandoned mine and a depleted oil-gas field could be utilized to conduct the CAES. We showed that challenges of the CAES were a previous competence evaluation of a storage site and an evaluation of an applicability for physical explorations.