

圧縮空気の硬岩内貯蔵に関する研究

学位論文内容の要旨

夏場あるいは昼間に先鋭化する電力負荷の平準化を図るための電力貯蔵技術として、圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン発電システム（CAES-G/T）が注目されている。このシステムでは、夜間などのオフピーク時の余剰電力を数MPaの圧縮空気に変換し、地下深部の岩盤内に設けた空洞に貯蔵しておき、電力のピーク時にこれを利用して発電を行うものである。

従来、CAES-G/Tシステムは圧縮空気を岩塩空洞に貯蔵する方式だけが成功している。岩塩のないわが国でこのシステムを実現させるために、圧縮空気の硬岩内貯蔵の実用化を目的として本研究を進めた。亀裂を含む硬岩中の空洞に圧縮空気を貯蔵するためには、人工的な気密を施す必要がある。また、わが国においては空洞の出入口に設ける耐圧プラグの合理的な設計・施工法が確立されていない。この2つを低コストで実現するための技術開発を本研究の目的とし、必要な調査・設計と室内試験を実施した。そして、研究開発した要素技術の実用性を総合的に検証するために、神岡鉱山の硬岩を対象に諸調査を行った上で、原位置貯蔵試験施設を構築し、種々の実験を試みた。本論文はこれらの諸研究を通して得られた知見を8章に亘って述べたものである。各章の概要は以下のとおりとなっている。

第1章は序論で、本研究の目的と意義について記載するとともに、既往の研究をまとめている。

第2章は、CAES-G/Tシステムを構成する地下構造物であるCAES空洞と耐圧プラグを硬岩中に設けるにあたっての設計法を提案している。発電諸元が与えられたときに、CAES空洞の深度を決定する方法と、空洞の気密方式を岩種によって選択する基準とを明らかにしている。またCAES空洞の出入口に設置するプラグは、耐圧性の観点からコニカルプラグが有利であることを指摘した上で、数値計算に基づいて合理的な形状を提案し、さらに鉄筋コンクリート製とすべき根拠を示している。本研究で提案するプラグの長さは、従来の代表的な設計法に従って求めた値の1/3となり大幅に短くなることを見出している。

第3章は、圧縮空気の硬岩内貯蔵によるCAES-G/Tシステム計画を立ち上げてから硬岩内空洞が完成するまでに行うべき調査内容とその流れを具体的に示した後、神岡鉱山における貯蔵試験施設の建設に先立って実施した周辺の地質と岩盤状況の調査結果ならびに種々の原位置試験と室内試験結果について記している。貯槽空洞軸に沿った水平ボーリング孔での真空透気試験から、試験坑

道に沿う岩盤の透気係数について $1.2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ の平均値を得、この値を基に漏気量を評価して、素掘り空洞でも気密性能は十分にあるという判断を得ている。また、坑道壁から奥に広がるゆるみの深さについて、弾性波トモグラフィー、RQD、透気試験から、1m 前後という評価を得ている。

第4章は、提案したコニカル形状の鉄筋コンクリート製プラグの耐圧性能を確認するために行った縮尺模型試験について記している。模型プラグの載荷試験によって、プラグの加圧側から反力側端面の左右の支承部に向かう応力の流れが形成されること、プラグは最終的には圧縮破壊を起こして構造体としての耐力を失うことなどを明らかにしている。また、メンブレン方式による気密工法を原位置空洞で採用することを想定して、最適なメンブレン材を見出すために、耐圧容器を用いた気密性能試験を行い、吹付け施工が可能で経済性に優れたゴムアスファルト・エマルジョンを中心とした3層の気密ライニング構造が要求性能を満たすことを確認している。

第5章は、神岡鉱山の地下深部の硬岩中に建設した 223m^3 の容積を持つ坑道タイプの素掘り空洞と長さ7mの鉄筋コンクリート製のコニカル形標準プラグについての施工実績を述べている。

第6章は、建設した貯蔵試験施設の気密性能と耐圧性能に関する試験結果について述べている。素掘り空洞は 0.6MPa の圧縮空気を保持するために、 $3.5 \text{ kg/min} \sim 15 \text{ kg/min}$ の空気供給を必要とし、要求される貯蔵性能を全く満たさないことが判明したために、空洞壁にゴム・アスファルトによるメンブレンを施工したが、調査の結果、貯蔵空洞周囲の不連続面やプラグー岩盤境界が貯蔵された圧縮空気の漏気経路として卓越しており、採用した気密対策では、これら2つの経路を完全にシールすることができず、吹付けによるメンブレン工法は実用の水準に達していないことを明らかにしている。一方、最大 4.5MPa の水圧を負荷した耐圧試験において、当該プラグの長さは従来の設計法に基づいた値の $1/3$ しかないにもかかわらず、貯蔵圧を受けたプラグとこれに接する反力側の岩盤は弾性的な挙動をしており、力学的に安定であることを確認している。

第7章は、岩盤の透気係数から予想される空洞の気密性能を素掘り空洞で達成できない原因を明らかにしている。その上で、泥水工法を実証試験空洞に適用し、作業が能率的でかつ短時間で済むこと、ならびに、達成された気密性能は必要な水準に達していること、を確認している。

第8章は、結論で、2～7章において得られた知見について簡単にまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二

副 査 教 授 金 子 勝比古

副 査 教 授 三田地 利 之

副 査 教 授 三 浦 清 一

学 位 論 文 題 名

圧縮空気の硬岩内貯蔵に関する研究

電力貯蔵の一方法である圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン発電（CAES-G/T）システムは、オフピーク時の余剰電力を数MPaの圧縮空気に変換し、地下深部の岩盤内に設けた大容量の空洞（CAES空洞）に貯蔵しておき、電力のピーク時にこれを利用してガスタービン発電を行うものであるが、現在までに、CAES空洞を岩塩内に設ける方式だけが実用に供されている。本研究の目的は、岩塩のないわが国でこのシステムを実現させるために、圧縮空気の硬岩内貯蔵技術を確立することにある。硬岩は内部に必ず亀裂を含むために、空洞には人工的な気密処理を施す必要があり、また、空洞の出入口に打設する耐圧プラグも高い気密性能が要求される。本研究では、CAES-G/Tシステムを低コストで実現するために必要なこれら2つの要素技術について、合理的な設計・施工法を考案し、室内試験を実施して性能を調べ、その上でCAES-G/Tシステムの実用性を総合的に検証するために、神岡鉱山において実規模の貯蔵試験施設を構築し、種々の原位置実験を行ったものである。

以下、本論文各章の成果を要約する。

第1章では、研究の目的と意義を明らかにするとともに、関連する既往の研究をまとめ、本研究の位置づけをしている。

第2章では、発電諸元が与えられたときに、CAES-G/T システムのための硬岩内空洞と耐圧プラグを合理的に設計する手順について述べ、岩種によって空洞の気密方式を選択する基準を明らかにするとともに、応力解析に基づいてコンクリート耐圧プラグの形状と材料を決定する根拠を示している。

第3章では、CAES 空洞を構築する硬岩の透気係数および空洞周囲に発達するゆるみの調査、ならびに初期地圧および岩盤強度の測定などが重要であることを指摘した上で、これらの調査・測定方法を神岡鉱山の原位置試験場に適用

し、得られた諸結果について述べている。

第4章では、提案したコニカル形状の鉄筋コンクリート製プラグの耐圧性能を確認するために行った縮尺模型試験について記し、圧力を受けてプラグ内に発生する応力状態を詳細に解析するとともに耐圧性能を評価する方法を示している。また、メンブレン方式による気密工法を採用することを想定して、耐圧容器を用いた気密性能試験を行い、要求される性能を満たすメンブレン材を見出している。

第5章では、神岡鉱山の地下深部の硬岩中に、 223m^3 の容積を持つ坑道タイプの素掘り空洞と長さ7mの鉄筋コンクリート製のコニカル形標準プラグを施工した実績について述べている。また、CAES空洞の漏気・漏水の発生個所と発生量を評価する原位置試験法についていくつか提案している。それらの内で、簡単な方法によって漏水の発生個所と量を知ることができる水張り試験法は著者の独創になるものである。

第6章では、建設した空洞の気密性能と耐圧性能に関する試験結果について述べている。まず、圧縮空気の漏洩量と漏洩箇所の調査を行い、素掘り空洞は要求される貯蔵性能を全く満たさないこと、空洞壁に施したゴム・アスファルトによるメンブレンは、空洞周囲の不連続面やプラグー岩盤境界などの卓越漏気経路を完全にシールできないことなどを見出している。つぎに、圧縮空気の空洞への出入りに伴う熱損失が空気漏洩に伴うもの以外に、空洞周囲岩盤への熱伝導によってもたらされることを明らかにしている。最後に、最大 4.5MPa の水圧を負荷した耐圧試験において、当該プラグの長さは従来の設計法に基づいた値の $1/3$ しかないにもかかわらず、貯蔵圧を受けたプラグとこれに接する反力側の岩盤は弾性的な挙動を示し、力学的に安定であることを明らかにしている。

第7章では、岩盤の透気係数から予想される空洞の気密性能をメンブレン工法によって達成できない原因を明らかにするとともに、泥水工法と名づけた工法を新たに提案し、その特徴を明らかにしている。そして、原位置で予想されるき裂開口幅に対処し得る泥水を設計し、本工法を神岡鉱山に建設した空洞に適用し、作業が能率的であり短時間で済むこと、ならびに、気密性能が必要な水準に達していることなどを見出している。

第8章は、本研究の結論であり、得られた知見を総括し今後の展望と課題を述べている。

これを要するに、著者は、圧縮空気を貯蔵するCAES空洞を硬岩内に構築することに関して、要求される品質を満たす設計・施工が可能であることを実規模原位置試験で実証しており、地下貯蔵技術ならびに岩盤工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。