

論文の内容の要旨

論文題目 岩盤空洞内熱水貯蔵・発電システム
成立可能性の技術的・経済的評価

氏名 八田敏行

わが国の電力負荷パターンは季節・日間の変動が大きく、年負荷率は約 55%程度と欧米に比べ低い。将来、原子力発電の割合が増加することも想定すると、負荷平準化を図り負荷率を向上させるための電力貯蔵の必要性は大きいと思われる。電力貯蔵の技術としては、揚水発電に加え、圧縮空気貯蔵ガスタービン発電システムなども実用化されつつあるが、電力貯蔵のニーズは大きく今後一層電力貯蔵技術の開発は重要になるものと期待される。

本論文は、発電所における夜間の蒸気・熱水の地下貯蔵、および昼間のピーク発電を組み合わせた「岩盤空洞内熱水貯蔵・発電システム」を提案し、その成立可能性について技術的・経済的な観点から詳細に検討したものである。

提案したシステムは、原子力発電所などにおいて、夜間運転時に発生する蒸気の一部を発電所近辺の地下岩盤内に建設した大規模空洞に貯蔵し、需要の大きい昼間に専用の蒸気タービンを用いて、通常の主タービンと並列運転するシステムである。蒸気を熱水の形で圧力容器に貯え、高負荷時に備える技術は工場などで古くから利用されており、原子力や石炭火力の大容量の蒸気を貯蔵しピーク負荷時に発電する有用性も以前より概念として提案されたことはあるが、このような高温高圧の大規模貯蔵は大きな課題であるとされており、その実現性に関する詳細な検討や課題の抽出は行われてこなかった。

また、世界的に見てもこのような地下施設は実現されていない。

本研究では、具体的に以下のようなシステム概念（スケール、基本システム構成）を構想し、大きく、(1)技術的検討と(2)経済的検討にわけ、実現可能性を明らかにした。

- ・発電所近辺の地下岩盤内に掘削された空洞を貯槽とし、その壁面は断熱材などで被覆せず直接熱水を貯蔵する構造とし、保温性については、貯槽岩盤の有する断熱性に期待し、気密性については、周辺の地下水による水封方式によることとした。
- ・ピーク時の出力を20～50万kW、発電時間を8時間とすると、このときに必要な貯槽の幾何容積は10～30万m³程度となる。また、最大貯蔵圧力を5MPaとすると、熱水の温度は264℃、貯槽の設置深度は500m程度となる。

(1) 岩盤空洞内熱水貯蔵成立可能性の技術的評価

発電機器に関してはほとんど既存の技術で構成されているが、地下岩盤内の空洞を貯蔵施設として考えることは革新的なものであり、その技術的成立可能性について明らかにする必要がある。地下貯蔵の技術的検討においては、海外国内事例による水封方式適用可能性の検討・高温実験事例の検討、数値解析による水封・保温性に関する検討、室内実験による岩石の熱特性に関する検討、数値解析による熱を考慮した岩盤力学的検討を行った。その要点は以下のようにまとめられる。

- ・我が国においては対象となる良好な岩盤は広く分布し、十分な立地可能性がある。本システムにおいては、熱水の貯蔵施設は発電所の近辺に設置することを特徴とするが、既存の発電所においても、原子力発電所をはじめとして多くの発電所は良好な岩盤に立地している。
- ・岩盤空洞での高圧貯蔵方式としては、スチールなどでライニングするライニング方式と地下水圧による水封方式があるが、神岡鉱山における無覆工空洞での高圧実験結果などを示し、水封方式は熱水貯蔵にも十分適用できることを議論した。
- ・放射性廃棄物処分を目的とした原位置での加熱実験結果を調査・整理することにより、岩盤内の熱伝導は数値解析により十分予測できることを明らかとした。また、変位や応力の予測を行う場合は、不連続面を含む岩盤としての物性値を用いる必要があること、その温度依存性を考慮する必要があることを明らかとした。また、既存の文献を収集し、高温下での岩石の力学特性や熱特性について整理を行った。
- ・熱応力解析を行う場合の、最も重要な物性値の一つが熱膨張特性である。岩盤の熱膨張特性の評価に際して、き裂の影響を考慮することは非常に重要である。そこで、き裂を含まない岩石およびき裂を含む岩石のそれぞれについて、高温下において熱膨張試験を実施することによって、岩石の熱膨張特性に対するき裂の影響は無視することができき裂の充填物の影響だけを考慮すればよいことを明らかとした。
- ・水封方式を採用したときの貯槽の気密性と保温性を検証するため2次元差分法による水-蒸気2相流・熱伝導連成解析を行った。この検討により、貯槽周辺への蒸気

の漏洩は発生せず高温の蒸気・熱水の貯蔵においても水封機能は十分に機能していることと貯槽の貯蔵効率は 98%を上回る高い貯蔵効率を有していることを明らかにした。また、周辺岩盤への熱伝導による温度上昇の影響は貯槽周辺に限られており、周辺環境への影響は非常に小さいことを明らかとした。

- ・貯槽空洞は高温・高圧下において安定性を保つ必要があるが、不連続性を含む岩盤としての定常熱応力の理論解を用いて貯槽空洞の安定性が確保できていることを明らかとした。続いて、熱応力解析を実施し、物性値の温度依存性を考慮しない場合も、考慮した場合も、空洞周辺において安全率が 1 以下となる領域は小さく、熱水貯蔵施設として貯槽空洞は十分に安定していることを明らかとした。

(2) 岩盤空洞内熱水貯蔵・発電システムとしての経済的評価

経済的な成立の可能性の検討においては、本システムを原子力発電所および火力発電所に適用した場合につき、おのおののシステム構成を検討し、施設建設から運転時の経済性を明らかにした。その要点は以下の通りである。

- ・100 万 kW クラスの原子力発電所にピーク時出力 20 万 kW、発電時間 8 時間の岩盤空洞内熱水貯蔵・発電システムを適用したとき、貯蔵圧力を 3～5 MPa とすると、必要な貯槽の幾何容積は約 10 万 m³ となった。そのときのシステム全体の貯蔵効率は 80%以上と高く、また、建設コストも 8 万円/kW 以下、ピーク時の発電単価も 10 円程度と非常に安く、既存の揚水発電などと比較し十分な経済的成立可能性を有していることを明らかとした。
- ・火力発電所に適用した場合においては、貯蔵効率が 60%以下と低くなった。これは蒸気の貯蔵・放出の過程で有効エネルギーの損失が大きいことが原因となっている。しかし、建設コストは 5.4 万円/kW 以下と小さいことより、リパワリング施設などとして期待できる。

以上の様に、本研究においては地下岩盤の有する特性を利用した岩盤空洞内熱水貯蔵・発電システムを提案し、技術的・経済的に十分実現可能であることを明らかとした。今後は、高温・高圧下の室内実験やフィールド実験を通し地下貯蔵の安定性・保温性を立証してゆくことが必要であろう。

今後は、地球温暖化における負荷低減の上で、特に既存の原子力発電所および新規建設における負荷平準化方式の検討は非常に重要なものであろう。総合的な安全性の向上とともに、既存・新設を問わず負荷平準化システムを組み入れる上で、本システムもひとつの有力な方策として活用されることを期待している。