

海洋 C A E S (圧縮空気貯蔵発電システム)

に関する調査研究

A Feasibility Study of Compressed Air Energy Storage in Sea Water

尾崎 重浩*・廣瀬 学**

Shigehiro Ozaki, Manabu Hirose

The study aims to evaluate the technological and the economical feasibility of compressed air energy storage in sea water system (Sea-CAES), which consists of Tank, Air Pipe and Gas-Turbine plant on the sea shore. We devised 4 types of Sea-CAES systems, and practiced feasibility study object of model topography. In the study, we obtained the major results as follows;

- (1) 4 types of Sea-CAES can be constructed by the current available technique in sea water (-300m sea level).
- (2) There are many optimum location for Sea-CAES in Japan.
- (3) Sea-CAES system can compete with generating cost of the pumped hydro system, if a Tank could be constructed on the deep sea water or the system could be a multipurpose plant.

Keywords: Compressed Air Energy Storage, Storage in Sea Water, Gas-Turbine, Pumped hydro system

1. はじめに

わが国では、近年の逼迫した電力需要に対処するための負荷平準化対策として、圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン (Compressed Air Energy Storage-Gas Turbine, 以下 CAES-G/T と言う) 発電が注目されている。すでに欧米では、地下の岩塩層の中に圧縮空気を貯蔵する CAES-G/T が運転中である。

ここでは、四方を海に囲まれたわが国の特性に着目し、海底に設置したタンクに、夜間電力で圧縮空気を貯蔵し、昼間のピーク時にそれを取り出して発電する「海洋 CAES」発電システムについて4種のコンセプトを考え、モデル地形を対象とした実現可能性評価 (FS調査) を行った。また、評価に当たっては、製作、施工、設置、環境影響評価、保守・点検、立地、法規、経済性等多くの観点から検討を加えた。

2. CAES-G/T 発電システム

CAES-G/T 発電システムは、夜間電力を有効に利用して、あらかじめ圧縮空気を製造・貯蔵しておき、ピーク負荷時にこの圧縮空気とともに燃料を投入しガスタービンを回し発電するものである。通常の発電用ガスタービンは、空気圧縮機を同時に駆動し高压空気を作りつつ発電を行う。その際、タービン全発生動力の60~70%が空気圧縮機の動力として消費される。しかし、このCAES-G/Tは、発電時に圧縮機動力が不要となるため、ガスタービン出力のほとんどを発電機に伝達することができ、同じ出力のガスタービンで同量の燃料を使用した場合に通常のガスタービンの2~3倍の発電出力が得られるという特徴がある。

3. 海洋 CAES の特徴

海洋 CAES は、図-3. 1 に示すように、①貯蔵タンク、②送気管、③ガスタービン発電所から構成され、その特徴としては以下のことが挙げられる。

- ①わが国は四方を海に囲まれているため、比較的多くの立地可能地点が考えられる。
- ②貯蔵タンクを海底に設置すれば、海水の圧力を利用した空気貯蔵が可能となる。すなわち、タンクに出入口 (通水バルブ) を設ければ、圧縮空気圧力と水圧とがバランスするため、陸上にタンク (圧力容器) を設置する場合と比べ、安全性が高く、貯蔵タンク自体を耐圧構造とする必要がない。

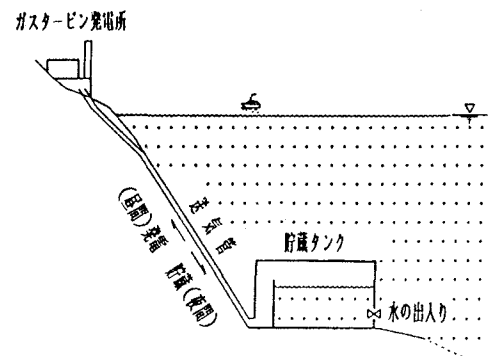


図-3. 1 海洋 CAES 概念図

* 正会員 (財) 新エネルギー財団 エネルギー貯蔵技術本部技術部技術第一課 (105 東京都港区虎ノ門2-7-7)

** 正会員 " " 技術部技術第二課長

4. 調査の基本諸元

海洋CAESの基本諸元を、表-4. 1に示す。なお、調査に当っては、図-4. 1に示すモデル地形を設定して検討した。

表-4. 1 海洋CAESの基本諸元

項 目	諸 元
発 電 出 力	1 0 万KW
発 電 時 間	6 時 間
圧縮空気貯蔵時間	7 時 間
圧縮空気貯蔵方式	定圧方式
送 気 温 度	5 0 ℃
貯蔵タンク設置地点	モデル地形を設定
貯蔵タンク設置水深	水面下300m
貯 蔵 圧 力	31.75気圧
圧縮空気貯蔵容量	10万m ³

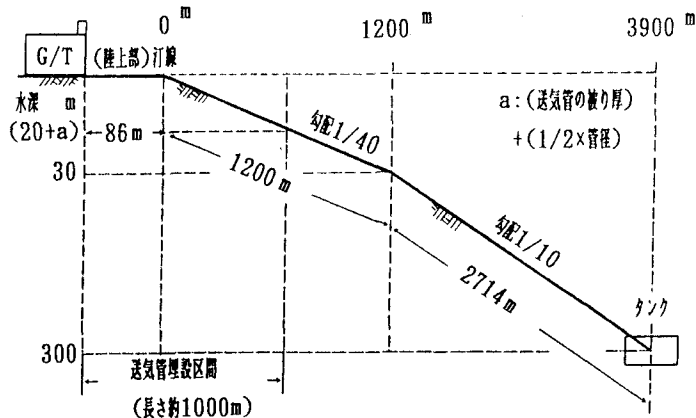


図-4. 1 モデル地形

5. コンセプト

海洋CAESのコンセプトとしては、以下の4方式を選定し検討を行った。図-5. 1にその概要を示す。

[ケース1：海底設置方式]

貯蔵タンクは鉄筋コンクリート製で、海底に沈設する方式である。また、貯蔵タンクの自重で、蓄圧終了時に作用する最大浮力に対抗する構造となっている。

[ケース2：海底係留方式]

貯蔵タンクは高強度軽量コンクリート製で、海底に浮遊させた状態で係留する方式である。このため、海底地形・海底地質の影響を比較的受けにくい構造となっている。

[ケース3：風船方式]

貯蔵タンクは「ゴム+補強繊維」の複合素材からなり、廃船タンカー上部に取り付け、沈設する方式である。このため、船体が海底に着底し、貯蔵タンクは直接海底に接しないため、海底地形が非常に急峻な地点を除いて海底の不陸（凹凸のある地形）を問題としない構造となっている。

[ケース4：プラットフォーム方式]

貯蔵タンクは鉄筋コンクリート製で海底に沈設し、これを基礎とするジャケット式プラットフォームを設置し、プラットフォーム上にガスタービン有する発電プラントを搭載する構造となっている。

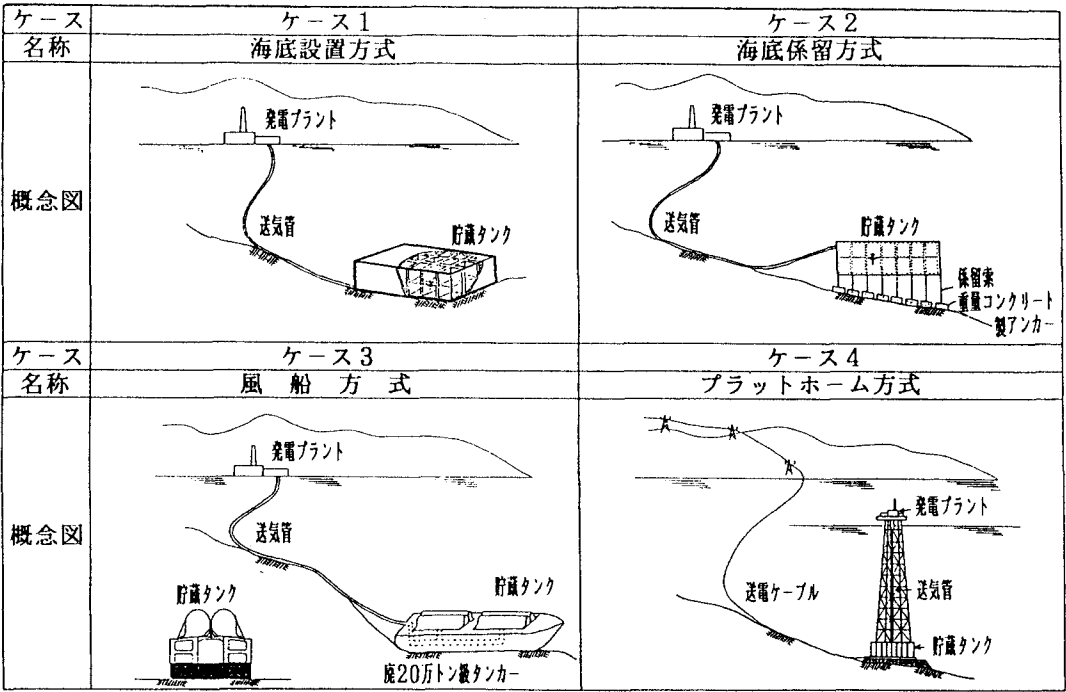


図-5. 1 海洋CAESコンセプトの一覧

6. モデル地形を対象としたFS

6. 1 貯蔵タンクの設計

貯蔵タンクは、陸上の発電プラントから送気管を通じて夜間には圧縮空気を貯蔵し、昼間には発電プラントへ向けて圧縮空気を送り出すものである。従って、夜間の満気時（圧縮空気10万m³貯蔵時）に最大浮力が作用することになる。

そこで、貯蔵タンクの安定性の検討は、満気時において浮力、滑動、転倒の検討を、また発電が終了した満水時において地盤支持力の検討を行った。その結果を表-6.1に示す。

表-6.1 各コンセプトにおける安定性検討結果

項 目	海底設置方式	海底係留方式	風 船 方 式	ブライホム方式
浮 力	○	○	○	○
滑 動	地震力：×	地震力：考慮 しない 潮流力：○	地震力：×	地震力：○
転 倒	—	—	—	○
地盤支持力	○	○	○	約20t/m ² の地盤が必要

（注）表中、○印は安全上問題なし、×印は構造上検討が必要。

これによると、海底設置及び風船方式において、満気時に多少（50cm程度）滑動する結果となった。この対策として、送気管と貯蔵タンクとの間にフレキシブルホースを採用することで対応可能と考えた。

6. 2 送気管の設計

送気管は、発電プラントと貯蔵タンク間（4km）を連結し、圧縮空気のやり取りを行うものであるから、経済性・施工性・安全性等を考慮して、次の条件を満たす仕様とした。

- ①沿岸から船舶の投錨が予想される範囲（水深20mまで）については、管体を防護するために土被り4mの深さに埋設すること
- ②管内の圧力損失が最小限（10％以内）となる管径を有すること
- ③外水圧に耐える強度を有すること
- ④波や潮流に対して安定性を確保すること
- ⑤湿り空気に対し、耐食性のある塗履装を施すること
- ⑥送気管と貯蔵タンクとの接合部は、作業が容易にでき、両者の移動（滑動）を許容できるフレキシブルホースとすること

これらの条件を基に設計した送気管の仕様を表-6.2に、断面の一例（適用水深0～75m）を図-6.1に示す。

表-6.2 送 気 管 仕 様

適用水深	管 径	管 厚	外面塗履装	内面塗履装	重量コーティング
0 ～ 75m	1066.8mm	15.9mm	ポリエチレン2.5mm	モルタル30mm	コンクリート130mm
75 ～ 180m	1066.8mm	22.2mm	ポリエチレン2.5mm	モルタル30mm	コンクリート 60mm
180 ～300m	1066.8mm	27.0mm	ポリエチレン2.5mm	モルタル30mm	コンクリート 30mm

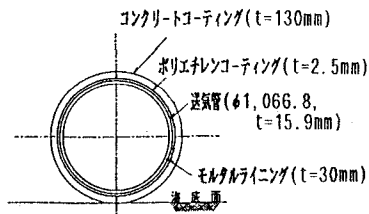


図-6.1 送気管断面図

6. 3 送気管の敷設と貯蔵タンクの設置

送気管の敷設は、安全性・信頼性等を考慮し、以下に述べる海底面を曳航する海底曳航法によるものとする。

- ①敷設ルート延長上の陸上に仮設ヤードを設置し、そこで所定のコーティング、ライニングを施された送気管を溶接接合しながら、沖合の曳航用台船上プーリングマシンで海底に曳出す。この作業を送気管の先端が、所定の位置に達するまで続ける。
- ②プーリングマシンの曳航能力に応じて、管体の水中重量を浮力ブイにより適宜調節する。浮力ブイの取り付け位置は、施工後の回収作業を容易にするため、できるだけ浅海域部に取付けるよう考慮する。
- ③貯蔵タンクとの接続用フレキシブルホースは、片端を送気管先端の接合部に接合し、他端を海面に浮遊させた状態で海底曳航を行う。

- ④貯蔵タンクが設置地点に曳航されてきた段階で、浮遊端をタンクに接続する。
- ⑤貯蔵タンクをウインチ台船で保持し、陸上の空気圧縮機を運転して、送気量とウインチ台船との吊り上げ力でタンクの姿勢制御を行いながら送気管とタンクを徐々に沈設する。
- ⑥貯蔵タンクの沈設が終了したら、吊りワイヤーを切り離す。
- ⑦浅海域の埋設作業は、グラブ船による事前浚渫及びガット船、トレミー台船による埋戻しによって行う。

6. 4 ガスタービン発電プラントの設計

ガスタービン発電プラントの設計においては、経済性・高効率化を考慮し、次の条件を満たす機器仕様とした。

- ①発電出力として、一応の目安である10万KW（圧縮空気貯蔵容量10万m³，貯蔵タンクは水深300mに設置）を想定する。
- ②ガスタービン用燃料としては、LGN，灯油，軽油を考える。
- ③ガスタービン発電プラントの高効率化を図るため、熱交換器（再生器）の適用を考える。
- ④他発電所事故時の緊急時に、圧縮運転から発電運転に切替えができるよう検討する。

これらの条件から設計した、ガスエキスパンダー（膨脹タービン）と低压タービンとを組み合わせた海洋CAES発電システムの系統図（一例）を、図-6. 1に示す。この場合、海水に含まれる塩分ミストが送気管を通じて発電プラント内へ入り込むことが予想され、除塵装置を送気管出口へ取り付け、フィルターを通すことによってミストの除去を考えていることが、一つの特徴と言える。当システムの主なプラント諸元は、表-6. 3に示すとおりである。

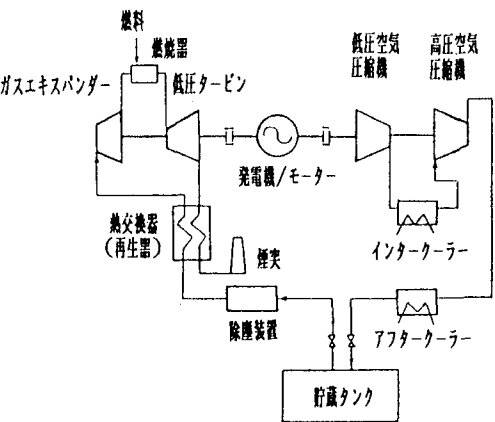


図-6. 1 海洋CAES発電システムの系統図

表-6. 3 プラント諸元

項 目	諸 元	備 考
流 量	約529,000 Nm ³ /hr	発電時
〃	約453,000 Nm ³ /hr	貯蔵時
圧 送 圧 力	31.75 Kg/ cm ² a	発電時(貯蔵タンク出口)
〃	37.00 Kg/ cm ² a	貯蔵時(送気管出口)
送 気 温 度	12℃	発電時(貯蔵タンク出口)
〃	50℃	貯蔵時(送気管出口)
貯 蔵 空 気 圧	31.75 Kg/ cm ² g	

7. 立地条件

海洋CAESの立地条件としては、陸上（発電プラント）側及び海洋側（貯蔵タンク、送気管）からみた場合によって、次の条件を満足することが望ましい。

(1) 陸上側からみた立地条件

- ①送電ロスを最小にするために、都市近郊型であること
- ②既設発電プラントの用地が利用できること
- ③燃料確保の容易さの観点からは、燃料基地近傍であること
- ④既設の送、変電設備が利用できるよう、既設発電設備が近傍にあること

(2) 海洋側からみた立地条件

送気管敷設費の低減を図るためには、沿岸から近いところに水深300mが確保できることが望ましく、ここでは一応の目安として、沖合5km程度で水深300mとなる場所を立地候補海域とみなした。

これらを踏えて海洋CAESの立地候補海域調査を行った結果、図-7. 1に示すようにほぼ全国的に分布していることがわかった。

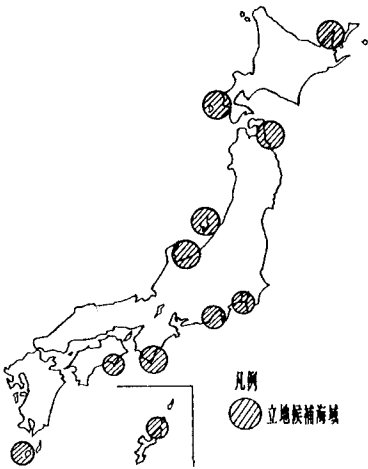


図-7. 1 海洋CAESの立地候補海域

8. 環境影響評価と保守・点検

8. 1 環境影響評価

出力15万KW以上の火力発電所を設置しようとする者（電気事業者）は環境影響評価を実施し、環境影響調査書を提出することになっており、今回の検討（10万KW）はその対象外ではあるが、わが国初の海洋CAESの建設ということになると、これに準じた扱いとして環境影響調査書を作成する必要があるものと考えられる。

8. 2 保守・点検

海洋CAESは、当然電気工作物扱いとなるであろうから、電気事業法に基づき定期検査を受ける必要がある。この場合、陸上発電プラントについては、基本的に通常の火力発電所の保守・点検と同じ扱いで対処できるものと考えられる。しかし、数百mという深海に設置される海中構造物（貯蔵タンク、送気管）については、基本的にメンテナンスフリーと考えるのが適切であり、モニタリングあるいはROV等を用いた簡単な保守・点検にとどまるものと考えられる。

9. 経済性の検討

モデル地形を対象とした海洋CAESの経済性については、次の見積り条件及び試算条件を基に検討した。

〔見積り条件〕

- ・平成3年度単価を基本に算出しており、物価上昇は考慮していない。
- ・研究開発等に要する諸費用、漁業補償費、用地費等は計上していない。
- ・工事稼働率は、陸上部85％，海上部60％と仮定した。
- ・ガスタービン及び機器関係等、費用の一部は推定値である。

〔試算条件〕

発電原価の試算は、以下に示す「初年度発電コスト」を用いることとした。

初年度発電コスト＝固定費＋可変費（燃料費）
＝建設単価・年経費率／（8,760×設備利用率）＋燃料単価／効率

燃料費、電気代等は、以下の値を用いた。

L N G 燃 料 価 格	: 1.89円／1,000Kcal（1989年CIF 価格）
燃 料 発 熱 量	: 13,041Kcal/kg（HHV）
電 気 代（貯 蔵）	: 2.46円／KWh（軽水炉燃料サイクルコスト）
年 経 費 率	: 18％（発電設備），13％（貯蔵設備）
電気比率（貯蔵電力／昼間電力）	: 0.82（アラバマ電力CAES実績値）
燃料比率（燃料／昼間電力）	: 1.22（アラバマ電力CAES実績値）

ただし、1日6時間、250日運転するものとした。

海洋CAESの各コンセプトにおける初年度発電コストは、表－9.1のようになる。

表－9.1 初年度発電コスト

コンセプト	発電設備 (万円/KW)	貯蔵設備 (万円/KW)	固定費 (円/KWh)		可変費 (円/KWh)		発電コスト (円/KWh)
			発 電	貯 蔵	電気代	燃料費	
海底設置方式	11.1	14.8	13.3	12.8	2.0	2.0	30.1
風 船 方 式	11.1	17.8	13.3	15.4	2.0	2.0	32.7
海底係留方式	11.1	19.9	13.3	17.2	2.0	2.0	34.5
プラットフォーム方式	13.2	41.1	15.8	35.6	2.0	2.0	55.4

表－9.1に示すとおり、海洋CAESは、4つのコンセプトのうち最も安い海底設置方式でも30.1（円／KWh）となり、モデル地形を対象とした経済性に関する限りやや高値である。今後の新材料、新技術等の開発によって、より一層のコストダウンが望まれるところである。プラットフォーム方式は4つのコンセプトの中では最も高い結果となったが、海洋CAES単独ではなく、例えば、プラットフォームを石油等地下資源掘削リグと兼用する、海象・気象等の観測拠点、深層水利用等の拠点とする、航空機や船舶の位置確認のためのレーダー基地とするなど、総合システムとして利用する観点からは、大変魅力あるコンセプトと言えよう。

10. 海洋開発への応用

海洋CAESは、次に述べる様々な多目的利用が考えられ、海洋開発・電源立地の促進という大きな視野で見れば、非常に価値のある、将来的に有望なシステムであることがわかった。

図-10.1に多目的利用の概念図を示す。

- ・高温エネルギーの利用
[地域暖房、温水プール等]
- ・冷熱エネルギーの利用
[地域冷房、冷水養魚等]
- ・圧縮空気そのものの利用
[海中エアーカーテン等]
- ・深層海水の利用
[海藻類の増・養殖等]

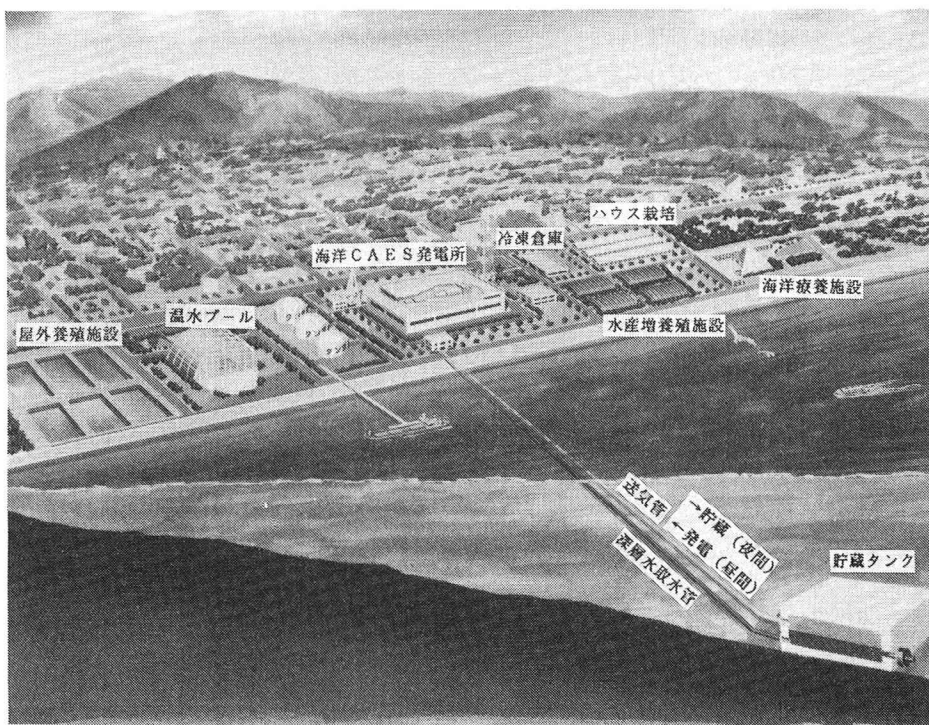


図-10.1 多目的利用の概念図

11. おわりに

本文では、モデル地形を対象とした海洋CAESのFS調査を実施し、その技術的・経済的成立性について検討を行った。得られた主な結果は、以下のとおりである。

- (1) 今回検討した4方式(①海底設置方式、②海底係留方式、③風船方式、④プラットホーム方式)は、幾つかの確認すべき事項(例えば、高圧空気の海水への溶解現象、万一の漏気時における安全性の確認等)を除いても現状技術で製作・設置がほぼ可能であると判断された。
- (2) 海洋CAESの設置地点としては、沿岸から近いところに比較的水深(数百m)の得られる場所が有利であり、そのような地点はほぼ全国的に分布していることがわかった。
- (3) 適地さえあれば、既存の火力発電所のリプレース等と組み合わせた建設も可能であると判断された。
- (4) 環境影響評価、保守・点検を行う場合、現状技術では水深300m付近までは可能であると判断された。
- (5) 海洋CAESの経済性は、既存の負荷平準化電源と比べてやや高いと思われる結果(初年度発電コスト; 30~55円/KWh)が得られた。好適地の選定、技術進歩(新材料、新技術等の開発)、あるいは多目的利用を図ることによって、将来、他の負荷平準化電源の発電コストに近付くことが明らかとなった。

謝 辞

本調査研究を実施するに当たり御指導、御協力頂いた海洋CAES技術調査委員会の委員、ならびに同ワーキンググループの委員の方々、関係官庁他、関係者各位に深く感謝の意を表したい。

【参考文献】

- 1) 土木学会 エネルギー土木委員会 新エネルギー技術小委員会; 圧縮空気貯蔵発電システム(CAES) と土木技術、-その現状と技術課題-、1990
- 2) 通商産業省・資源エネルギー庁、財団法人 新エネルギー財団; 平成2年度 新型負荷平準化電源環境影響評価技術調査報告書、1991
- 3) 財団法人 新エネルギー財団; 第1回 圧縮空気エネルギー貯蔵発電セミナーテキスト、1991
- 4) 財団法人 新エネルギー財団; 平成3年度 海洋CAES(圧縮空気貯蔵発電システム)に関する調査研究報告書、1992
- 5) 宮地巖; 海水を利用するエネルギー貯蔵発電方式の調査研究、海水エネルギー貯蔵発電方式研究会、1981
- 6) 堀井憲爾、宮地巖; 海水を利用するエネルギー貯蔵、エネルギー資源、Vol. 9, 1988
- 7) 西 亮; 圧縮空気貯蔵ピーク発電装置の研究、宮崎大学工学部研究報告、第34号、1988
- 8) 角福正剛、内山洋司; 海底圧縮空気貯蔵の成立性、日本造船学会、第9回、海洋工学シンポジウム、1989