

経済・エネルギーの展望

ホロニックなエネルギー社会を拓く 圧縮空気利用システム¹⁾

“Holonic” energy supply system developed by
advanced compressed-air energy storage technologies

キーワード：圧縮空気貯蔵，ガスタービン発電，
コージェネレーション，海水浄化

内 山 洋 司

急増する世界人口，炭酸ガスによる地球温暖化，反原発運動，化石燃料の資源枯渇など地球規模の社会問題に人々の関心が高まりつつある。そしてそれらはすべてエネルギー問題と深く関わっている。21世紀に向け安定したエネルギー供給社会を築くには，従来と異なる新しいエネルギー供給システムが求められている。それに応えるエネルギー供給方法の1つに圧縮空気利用システムがある。それは夜間の安価な電気や自然エネルギーでもって圧縮空気を貯蔵し，それを需要家のニーズに合わせて供給するシステムである。本論文で紹介する新しく考案した新型圧縮機や貯蔵・利用技術は，将来，その開発により空気の利用を発電だけでなく一般産業における動力や水質浄化などに広く普及させるであろう。圧縮空気利用システムは，大型電源と分散型技術との協調を図ることで両者の利点を発揮するだけでなく自然エネルギーの利用を一層拡大する。そして同時に化石燃料の節約を図り，環境保全とエネルギーセキュリティを高め，ホロニックなエネルギー社会を拓くことになる。

- | | |
|---------------|-----------|
| 1. はじめに | 2-3. 空気利用 |
| 2. 圧縮空気利用システム | 3. おわりに |
| 2-1. 空気製造 | 文献 |
| 2-2. 空気貯蔵 | |

1. はじめに

空気と水，そして土は，地球を構成する基本要素であり，生物の生存に欠かせないものである。人口の増大と産業の発展は，その環境を徐々に汚染し，今，地球規模での環境問題を社会に巻き起こしている。それは，これまでの環境問題と異なり，大量のエネルギー消費が原因であって，むしろ地球規模のエネルギー問題と

もいえる。

1970年代の石油危機で世界のエネルギー消費は，一時その伸びが鈍化した，その後の石油価格の暴落などにより再びその消費が増大し始めている。エネルギーの大量消費が今日の技術文明社会を支えているのは否定できないが，

1) 本論文は，エネルギー・資源学会創立10周年記念での技術奨励賞論文（1990年4月）を一部修正し著わしたものである。

21世紀に向け人々が安心して生活するためには、環境保全を重視し総合的な見地からエネルギーの有効利用を図った新しいエネルギー供給システムの構築が求められている。

ここに紹介する圧縮空気利用システムは、それに応えるエネルギー供給システムの1つで、その導入は21世紀における電力を安定に供給する。それは夜間の安価な電力や自然エネルギーを圧縮空気に変換して貯蔵し、それを需要家のニーズに合わせて供給するシステムである。圧縮空気は発電、動力、あるいは海洋浄化など、その利用範囲は広い。その利用拡大は、原子力発電のような巨大技術と分散型技術との協調を図ることになり、同時に化石燃料の節約によって環境保全とセキュリティを高め、エネルギーの経済的な供給を可能にする。またシステムは、その貯蔵に空気、水、土を利用していることから環境に優しいエネルギー供給方法である。このエネルギーシステムが拓く新しいエネルギー社会を紹介しよう。

2. 圧縮空気利用システム

空気は地球の表面上の空間を覆う媒体で、それは生物の生存と成長に欠かせない貴重な気体である。しかし空気は水と同様我々の周辺に無限に存在し余りにも豊富であるため、人々はそれから受ける恩恵について案外無関心で過ごしてきた。ここに述べる圧縮空気利用システムは、空気の有用性を再認識し、それを産業の動力源や他の用途に広く利用しようとするものである。それは、圧縮空気の製造、貯蔵、利用の各分野において、今後、様々な技術の発展が期待できる。

2-1. 空気製造

圧縮空気は、空気圧縮機で製造するが、一般

に圧縮の際に多量の熱が発生する。それは圧縮機の消費動力を大きくしている。理論的には、圧縮機で消費する電気はすべて熱に変換してしまう。エネルギーの有効利用からみれば発生した熱が利用できれば好ましいが、残念ながら経済的な理由から普通は捨てられている。質の高い電気を熱に換え、それを捨てるのは無駄なことである。電気の消費を節約するには、圧縮時の発熱を抑えて圧縮効率を高めなければならない。

通常、圧縮効率の向上は多段冷却圧縮法で行う。それは圧縮により高温になった空気を冷却装置を通して冷し再び圧縮するという過程を繰り返すものである。この方法で効率を高めるには、できるだけ段数を増やせば良いのだが、そうすると設備費やポンプ動力費など経済的な負担が大きくなり、普通は2～4段で冷却している。もし理想的な圧縮法である等温圧縮ができたなら、消費動力を大幅に節約することになる。

図1は、新しく考案した液体冷却による新圧縮法である。その原理は、気体の圧縮媒体に液

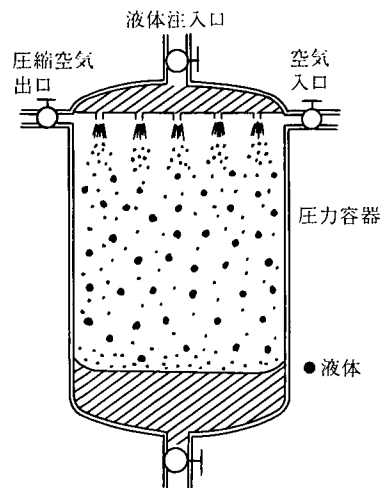


図1 液体冷却による新圧縮法

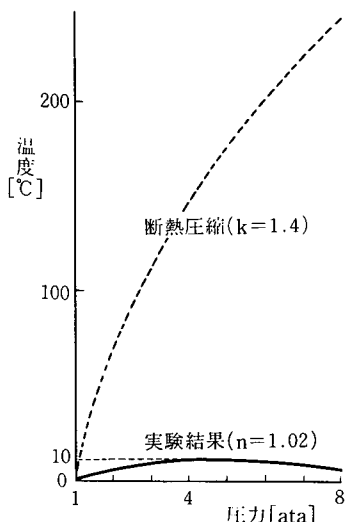


図 2 液体圧縮の実験結果

体を使い、その液体で気体を冷却しながら圧縮する。図に示すように圧力容器の上部から注ぎ込まれる液体は、気体を冷却しながら容器の下部に溜まり気体を圧縮する。この方法によれば、1つの容器内で気体の冷却と圧縮が同時に行われ、無限段冷却圧縮でもって等温圧縮に近い圧縮をすることができる。

この方法で空気を圧縮すると、圧縮空気の温度は上昇しにくいことが実験で明らかになっている。図2は、直径60cm、高さ70cmの圧力シリンダーでの実験結果を示したもので、最大圧力8ataまで圧縮したとき空気の上昇温度は僅か10~15°Cであった。また4ataまでの圧縮時間を20~60秒まで変えておこなった実験では、空気の温度上昇は圧縮速度に影響を受けずほぼ一定であった。今回の結果から4ataまでの温度上昇を10°Cとしてポルトロップ指数²⁾ n を求めると1.024となり、その値は等温圧縮の値 ($n=1.0$) に非常に近いことがわかる。計算で求めた消費動力は、通常の圧縮機 ($n=1.42$, 昇温180°C) の80%になる。

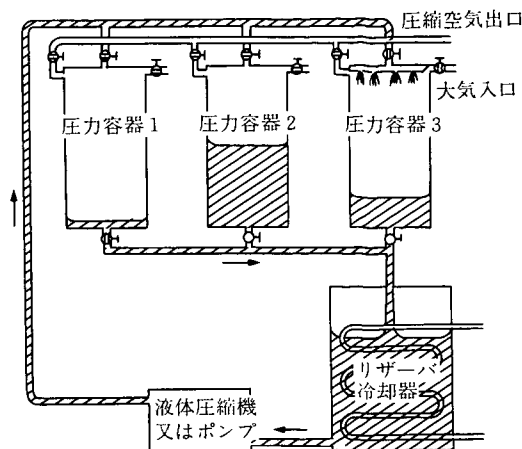


図 3 液体冷却空気圧縮装置

この圧縮法による圧縮機は、非圧縮性媒体である液体を圧力容器に送り込めばよいので、従来の圧縮機のように気密性を保持するための精密さを必要とせず、装置の設計と制作が容易になる。図3に圧縮装置の概念を示す。ポンプまたは液体圧縮機で圧縮された液体は、圧力容器で空気を圧縮した後、冷却装置に戻り再び利用される。弁は油圧制御または自然開閉され、1つの容器で空気を圧縮している間、他の容器中の液体は冷却器であるリザーバに流れ込み、同時に容器に新しい常圧の空気が入るように弁の開閉操作が行われる。

液体の圧縮には、その動力源として電気以外に自然エネルギーも利用できる。図4に、波力と風力を回転エネルギーに変換し、その動力でポンプを駆動して液体を圧力容器に送り込む方法を示す〔1〕。この方法を使うとエネルギー密度の小さい自然エネルギーは、エクセルギー

2) 系と外部との間に熱交換がない可逆断熱変化での状態方程式は $PV^k = \text{一定}$ で表わされる ($k=1.4$)。しかし、実際の圧縮、膨張過程は、系への熱の出入りがあり、状態方程式は $PV^n = \text{一定}$ と表わされ、 n をポルトロップ指数と呼んでいる。

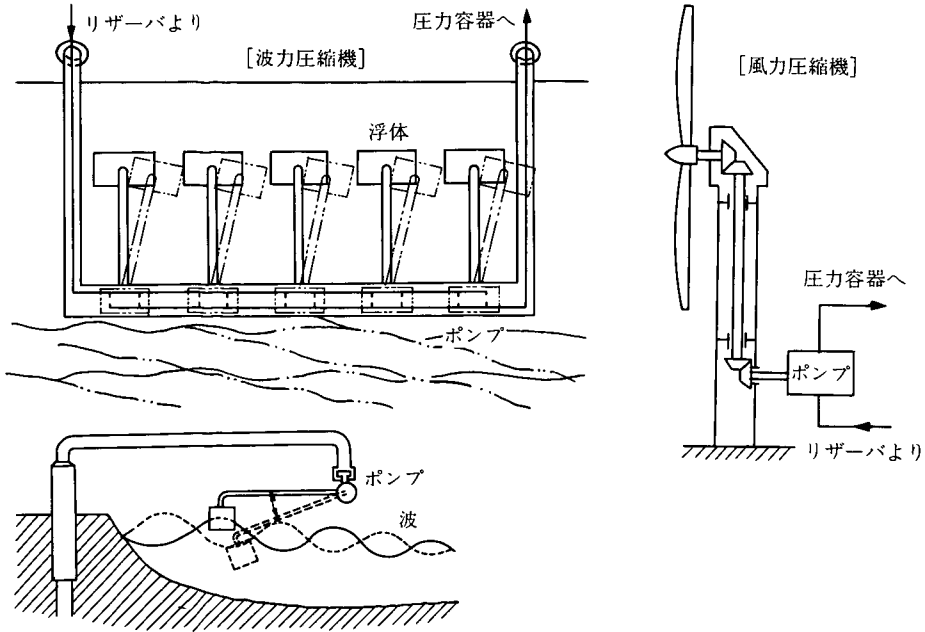


図 4 波力、風力による空気圧縮法

の大きな高圧空気としてコンパクトに貯わえられ、そしてそれは需要家のニーズに合わせて発電、動力、あるいはエアレーション³⁾などに利用できることになる。

別の自然エネルギー利用法として、水の位置

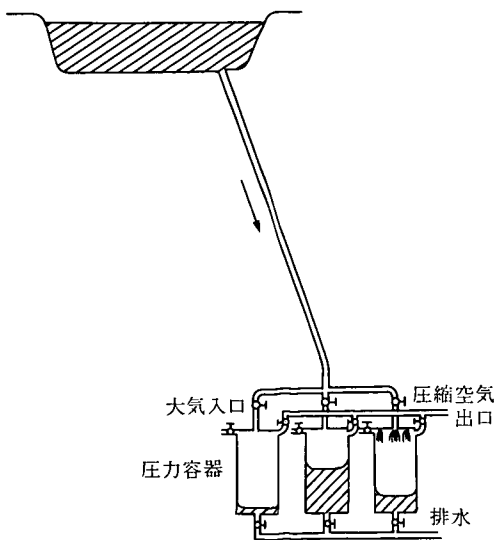


図 5 水力による空気圧縮法

エネルギーにより圧縮空気を製造する方法がある。図5にダムなどの水圧を利用した圧縮空気の製造方法を示す。圧縮空気を液体で冷却しながら造る基本原理は、図3、4と同じであるが、圧力容器に順番に流れ込んだ水は気体を圧縮した後、そのまま外部に放出される。この方法は、動力源に水のヘッド圧を利用していることから、設備は圧力容器の他には、弁・配管とその制御装置だけの簡単なものとなる。

2-2. 空気貯蔵

製造した圧縮空気は、そのまますぐに利用してもよいが、貯蔵して需要家のニーズに合わせて供給すればその価値も高くなる。特に、季節や気候で変動する自然エネルギーや夜間など電力負荷の低い時の大型電源による余剰電力を、昼間の電力需要の高い時に利用すれば、その

3) ばっ気とも呼ばれ、汚水を空気と接触して処理する方法をいう。この方法により、汚水中の二酸化炭素、硫化水素、メタン、臭気の原因になる有機物などの除去と溶解二価鉄イオンの酸化沈澱が行える。

分、化石燃料が節約できる。エネルギーの貯蔵は、出来るだけエネルギー貯蔵密度が大きく、かつ変換時のエネルギー損失の小さい方法が好ましい。電力貯蔵技術の中で、蓄電池、フライホイール、超電導のように化学、運動、磁気的エネルギーとして貯蔵する方法は、エネルギー密度が高く貯蔵効率も比較的良好。しかし、それらは貯蔵するのに精密な化学装置や機械装置を使うため設備費が高くなるという欠点がある。それに対し、揚水発電や圧縮空気のように水の位置エネルギーや圧力を利用する方法は、エネルギー貯蔵密度は低いが、設備が土木工事を主体として造れるため、設備のコスト低減と大型化が図れる利点を有している。その中で、圧縮空気貯蔵は、立地点の確保が次第に厳しくなりつつある揚水発電の代替技術として期待されている。

圧縮空気の貯蔵法には、定圧式と変圧式がある。定圧式とは、水のヘッド圧で圧縮空気を貯わえる方法で、空気の出し入れ時の貯蔵空気圧はほぼ一定である。それは圧力が、大きく変動する変圧式に比べたとき、貯蔵タンクの容量を

小さくでき、かつ貯蔵タンクが圧力容器にならないという特徴を有している。定圧式と変圧式とで同じ量の空気を貯わえるのに必要な貯蔵容量の比は、温度を一定とすると次式で表わされる。

$$V_v / V_c = P_c / (P_1 - P_2) \quad (1)$$

V_v : 変圧式の貯蔵容量

V_c : 定圧式の貯蔵容量

P_c : 定圧式の貯蔵圧力

P_1 : 変圧式の最大貯蔵圧力

P_2 : 変圧式の最低貯蔵圧力

貯蔵設備は、安全性や経済性を考えると地下や海底に設置するのが好ましい。そうすれば、容器には外圧として地圧または水圧がかかり、その分、地上に設置するよりも容器の設計が容易になるか、あるいは高い圧力で空気を貯わえることができる。図6に、地下あるいは海底を利用した貯蔵方法を示す。

地下貯蔵の場合、岩塩層に空洞を掘るのが最も経済的であるが、岩塩層のない我が国では岩盤を利用する以外にない。地下岩盤のうち浅部での貯蔵は基本的には変圧式となる。そして設

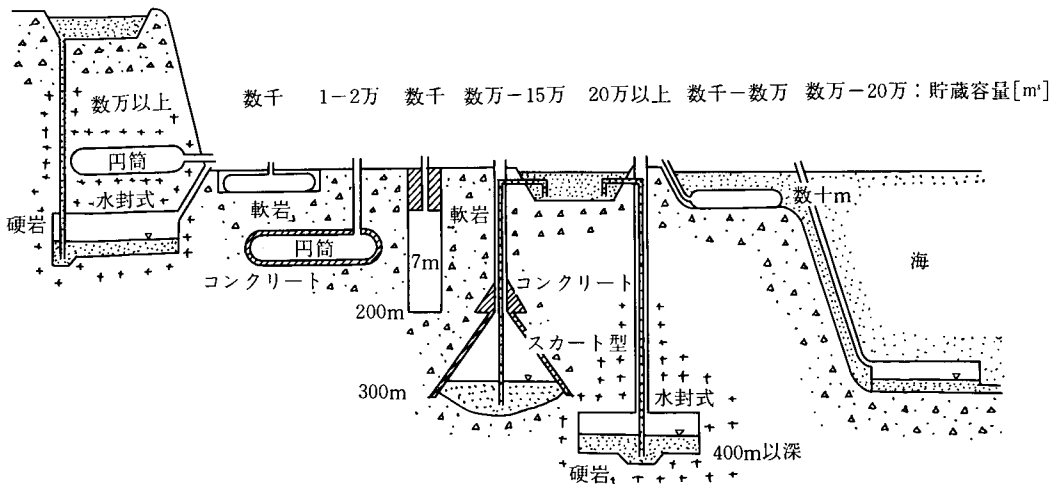


図6 圧縮空気の貯蔵法

置位置が浅いほど掘削は容易になるが、逆に貯蔵タンクには耐圧が要求される。また効率良い貯蔵を考えると、空気はできるだけ高圧にしたほうが良いが、そうすると貯蔵タンクの耐圧設計が厳しくなって貯蔵容量が小さくなってしまふ。

それを解決するには、貯蔵タンクをできるだけ地下深くに設置し地圧でもって容器の耐圧性を確保すればよい。しかし軟岩の深部掘削は、技術的にみて難しい課題が多く、図6に示すような経済的な掘削法を開発していく必要がある。岩盤が硬い（一軸圧縮強度 150 kgf/cm²以上）と地下空洞は掘ったままの状態を空気を貯わえることができる。その場合、気密性は水封式と呼ばれる方法で保たれる。それは空洞の周囲にウオーター・カーテンでもって空気の漏洩を防ぐもので、貯蔵空気はその深さに相当する水圧で一定に保たれている。この工法は既に石油備蓄で我が国でも実績はあるが、その深さはせいぜい100メートルで、数百メートルの深さでの経験はまだなく技術的課題が残されている。

しかし我が国のように山が多く四方を海に囲まれているところでは、その特異な地形を利用して圧縮空気を貯わえることができる〔2〕。図6の左端は、丘あるいは山の上に池を設けてその水圧を利用して山の中の貯蔵タンクに圧縮空気を定圧で貯わえたものである。この方法は、貯蔵タンクを地中の深いところではなく、ほとんど地表と同じレベルのところトンネル掘削と同じ技術で掘ることができる。それにより土木作業は容易となり、サイトを選べば建設費も安くなる。貯蔵法は地下揚水発電と同じであるが、同じ量の電気を発電するのに必要な上池および空洞の容量は揚水発電の僅か10～15%

ですむ。

図の右端に示すように、もし貯蔵タンクを海底に設置したとすると、あまり深い所でなければ工事はさらに容易になる〔3〕。この方法の特徴は、貯蔵タンクを始めとする多くの設備が工場で作成でき、リスクが高い現場工事が少なくなることである。また貯蔵空気圧も設置深さに相当する水圧でバランスしているため、タンクは圧力容器でなくなり設計と製作が楽になる。

岩盤の空気貯蔵方法には、地下に新しい空洞を掘らなくても、石炭や金属鉱山の廃坑、廃トンネルなどを利用する方法もある。既存のインフラ利用は、技術課題も少なく経済性も高いことから最も実現の早い方法と考えられる。今後、我が国では、鉱山と炭鉱はその経済性の厳しさから閉山が増えることは確かで、そのインフラ利用は地域振興と鉱山技術の基盤維持の為にも重要となる。

経済性を高めるには、空気貯蔵設備を他の構造物とハイブリッドにすることも考えられる。それは、構造物内部の空間を利用してそこに空気を貯わえるもので、例えば海洋では、防波堤や護岸、海底漁礁や海洋構造物の基礎との兼用がある。また陸上でも、洪水防止に造られる地下ダム、構造物の基礎杭、あるいは核シエルターなど、利用できる設備は多い。この場合、空気の貯蔵法は変圧式で、数十気圧以上の圧力にして貯蔵することになる。貯蔵した空気は、発電以外に、都市の防災、一般動力、エアカーテン、空調、エアレーションなど様々な用途に利用できる。

2-3. 空気利用

圧縮空気を大量に使用する技術に圧縮空気貯蔵発電システム（以下 CAES と呼ぶ）があ

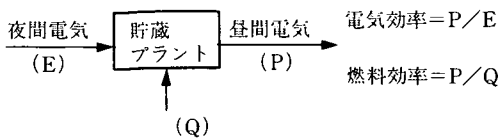
る。CAES は既に独国のフントルフで電気出力 290 MW のプラントが実用化しており、米国でも 110 MW のプラントを現在建設しつつある。この技術に関する説明および経済性の検討については、既に幾つかの報告がでている(例えば文献 [4], [5])。ここでは、将来の CAES の発展性について研究した結果を説明することにす。

CAES は、電力貯蔵技術のなかでは比較的開発課題も少なく商用化しやすい技術である。実用化には経済性の向上が課題で、それにはまず第一に貯蔵設備の建設費を低減する技術開発が重要となる。しかし、性能の優れたガスタービンと圧縮機の開発もその経済性を大きく向上する。このシステムは、ガスタービンと圧縮機とが分離しているため、それぞれを独立に開発できるという特徴を持つ。ガスタービンの高効率化には、レヒートサイクル、ガスタービン入口温度の高温化、蒸気噴射ガスタービンなどの技術開発がある。

表 1 に高性能ガスタービンと本論文で紹介した新型圧縮機などの開発により、将来 CAES の効率がどのように向上するかを示す。表の熱

表 1. CAES の効率向上

プラント		電気効率	燃料効率	貯蔵効率
現 状	西独フントルフ	1.2	0.6	0.60
	米国アラバマ	1.2	0.8	0.75
将 来	熱貯蔵	1.0	1.2	0.75
	高性能 G/T	1.6	0.9	≒1.0
	新型圧縮機	1.5	0.8	≒1.0



貯蔵とは、既存の圧縮機で夜間に発生する熱を貯蔵し、それを昼間の発電時に利用して燃料の消費を削減するシステムである。それに対し新型圧縮機の開発は、電力消費を大幅に削減する。表の値は、新型圧縮機の消費動力に 10% の機械損失を考慮して計算した効率である。得られた貯蔵効率は 100% に近い値で、その値は揚水発電の 70%、超電導貯蔵の 90% に比べ大きい。このように CAES は、他の電力貯蔵技術と違い、貯蔵と発電のハイブリッドシステムであるため、その貯蔵効率は将来大きく向上していく。

上に述べた CAES は、その電気出力が 10 万 kW 以上の大型電源であるが、数万 kW 以下の分散型技術の普及も考えられる。図 7 は、夜間電気を利用し、需要家に温熱、冷熱および昼間のピーク負荷時の電気を供給する新しいコージェネレーションシステムの熱収支を示したもので、図の値は既存技術だけでシステムを構成したときの値である。このシステムで、もし圧縮機の発生熱が有効に利用できれば、需要家側での負荷平準化と廃ガスや熱排出のない環境にク

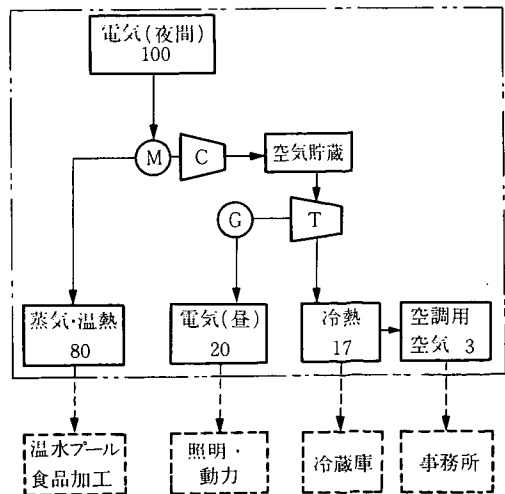


図 7 コージェネレーション・システム

[文 献]

- [1] 内山洋司, 星野謙三 “新型圧縮機の開発と自然エネルギー貯蔵” 第8回エネルギー・資源研究発表会 (1989年4月)
- [2] 内山洋司 “わが国における圧縮空気貯蔵システム” エネルギー・資源 VOL. 9 (4) (1988年7月)
- [3] 内山洋司, 吉崎喜郎 “海中における圧縮空気貯蔵システム” 電力経済研究 No. 24 (1988年1月)
- [4] 内山洋司, 清野圭子 “電力貯蔵技術の経済性比較” 電力経済研究 No. 24 (1988年1月)
- [5] 内山洋司, 角湯正剛, 林 正夫 “圧縮貯蔵発電システムの経済性評価” 第6回エネルギーシステム・経済コンファレンス (1989年1月)
- [6] 内山洋司, 角湯正剛 “圧縮空気利用システムとその導入効果” エネルギー・資源 VOL. 9(5) (1988年9月)

(うちやま ようじ
経済部 エネルギー研究室)