

<地球環境・省エネルギー>

都市型 CAES コージェネレーション システムとその経済性

Economic study on compressed energy storage cogeneration system
in urban areas

キーワード：圧縮空気貯蔵，コージェネレーション，経済性，負荷平準化
ガスタービン

内 山 洋 司

都市への機能集中と冷房機器の普及で，都市のエネルギー需要が，特に夏期を中心に急増している。電力の負荷率向上は電力会社の重要な課題となっているが，それを積極的に改善する技術に電力貯蔵がある。圧縮空気貯蔵 (CAES : Compressed Air Energy Storage System) は，電気事業における将来の電力貯蔵技術としてその導入が検討されているが，それはガスタービン技術でもあることからコージェネレーションシステムにもなる。もしガスタービンや圧縮機の排熱が有効に利用できれば，電力の負荷率を改善するだけでなく，エネルギー総合効率の向上と環境問題の改善にも貢献することになる。本稿は，圧縮空気貯蔵を都市のコージェネレーションシステムとして需要家側に設置したとき，その成立性を経済性を中心に研究したものである。

1. はじめに
2. CAES の特長
 - 2.1 原子力発電の PA 対策と経済性向上
 - 2.2 化石燃料の節約と CO₂ 排出量の低減
 - 2.3 電力システムの信頼性向上
3. 内外の開発動向
4. ニュータウン地域への CAES システム導入
5. 経済性
6. おわりに

1. はじめに

圧縮空気貯蔵発電 (CAES : Compressed-air energy storage system) は，西ドイツで既に商用化しており，米国でも現在建設中である。それらは，圧縮空気を地下の岩塩層に貯蔵したもので，岩塩層のない我が国でこの技術を成立させるには，地下や海底を利用して貯蔵タンクを安価に設置する方法を考えていかなければならない。特に電力の多消費地帯である都

市部の地下は，ほとんどが軟らかい岩盤（一軸圧縮強度が 100 kg/cm² 以下）である。そういった岩盤は崩れやすいため地下深くまで掘削して大空洞を掘ることは困難である。それは空洞の建設費用を増大し，CAES システムの経済性を悪くすることになる。

CAES システムの普及拡大を我が国で図るには，燃料の輸送や送電問題を考えると，電力消費地である都市部に立地していかなければならない。そのためには，軟らかい地下岩盤に安

価に空洞を掘る技術が求められる。あるいは発電プラントの総合効率を高めて高い建設費を相殺することが必要である。総合効率を高める方法の1つに、プラントで発生する熱を有効に使う、所謂、コージェネレーションシステムがある。本稿は、温熱需要が比較的大きい民生部門にCAESシステムを導入し、需要家の電力/熱需要に対して負荷平準化と熱供給を行ったとき、その経済性はどのような条件下で成立するかを分析したものである。

2. CAESの特長

CAESシステムは、ガスタービン発電に必要な高圧空気を夜間やオフピーク時の安価な電気で作成し、昼間その貯蔵した圧縮空気と燃料とでガスタービンを駆動し発電するものである。それにより、ピーク時は圧縮機の駆動が不用となるため、その分の燃料が節約できると同時に、タービン軸出力は100%発電機の駆動に使え、発電出力は2~3倍も増えることになる。このようにCAESは、昼間、燃料を使って発電しているため、完全な電力貯蔵技術ではなく、貯蔵と発電のハイブリッド技術である。そのうえ、貯蔵と発電の比率も、システム構成を変えることで、任意に選ぶことができるという特長を有している。

電力貯蔵技術のうち、揚水発電は立地制約があり、蓄電池は小型で、超電導はまだ実用化に程遠い。それに対し、CAESは一部の貯蔵設備を除き、開発課題が比較的少なく、30万KW以下の中小型電力技術として、近い将来、揚水発電の補完電源として導入が期待できる。それは上に述べた技術的な特長の他に、その導入により次に示すような電力貯蔵技術としての効果を数多く社会にもたらす技術である。

[文献1]。

(1) 原子力発電のPA対策と経済性向上

電力貯蔵技術は、電力の負荷平準化によって原子力発電の負荷追従運転を不用にし、定格出力で安定に運転させることができる。それは原子力発電の安全性、少なくとも出力調整問題において国民が持つ不安を解消することに役立つ。また、原子力発電の出力調整運転を無くすことは、同時に稼働率を向上してその経済性を高めることにもなるし、大容量技術や高燃焼度化といった大型電源本来の技術を発展することにもなる。CAESは、その導入で大型電源が持つ利点を最大限に発揮し、かつパブリックアクセプタンスの改善にも貢献するものである。

(2) 化石燃料の節約とCO₂排出量の低減

CAESは、圧縮機動力分を夜間の余剰電力に振分けることで、ピーク時のガスタービン燃料の消費を削減する技術である。夜間電力の消費を無視し燃料消費だけで効率を計算すると、その燃料効率は、現在のCAES技術でも80%以上、将来、ガスタービン技術が進歩すれば95%近くにも達する。このことは、LNG火力が複合発電にしても精々50%以下であることを考えると、CAESが如何に燃料を節約できるかが分かる。もし、我が国の石油火力とLNG火力を全てCAESに置き換えたなら、燃料の消費量を55%も節約することになる。それをLNG複合に置き換えても、その節約量は20%に過ぎない。

このことはエネルギーの海外依存度が高い我が国にとって、将来、CAESがエネルギーセキュリティの面で大きく貢献する技術であることを意味している。また燃料消費の節約は、同時に発電所の排ガス量を減らすことにもなり、CO₂やNO_x、SO_xなどの大気汚染物質を削減

することになる。

(3) 電力システムの信頼性向上

我が国の電力システムの負荷率は年々低下する傾向にある。1965年に71%であったのが、現在は59%、将来は57%にまで下がると予測されている。電力貯蔵技術は、負荷の平準化によって、負荷率を向上するものであるが、それ以外に停電の防止や電圧・周波数調整といったシステムの信頼性を高める働きがある。また信頼性が高まる分、補償設備や燃料の無駄が解消でき経済性も高まることになる。ガスタービン技術であるCAESは、負荷追従能力に優れており、システムの信頼性と経済性の向上において十分に應える技術である。

3. 内外の開発動向

CAESシステムは、新しい技術ではなく、既に1978年にドイツのフントルフで実用機(29万KW)が建設され、運転実績がある。フントルフ以外に建設中のもの、実験を実施中のもの、計画されているものが各国であり、表1はそれらを取りまとめたものである。海外での事例において圧縮空気の貯蔵場所は、安価に建設

できる岩塩層が多く、また地下の滞水層での実験あるいは建設を計画している場所も見受けられる。米国では、アラバマ電力が、マッキントッシュ地点に11万KWの発電所を建設し、1991年の6月に運開している。これは地下の岩塩層を利用し、60気圧で約50万m³の空気を貯蔵し、電力負荷の週間調整をするプラントである。

我が国では、約10年前から(財)電力中央研究所を中心に岩盤あるいは海中に圧縮空気を貯蔵することを考え、その成立性が検討されてきた[文献2, 3, 4]。負荷平準化の電力貯蔵技術には、揚水発電があるものの、その経済的な地点が少なくなってきたり、されに代わるものとして最近CAESの有有望性が認められつつある。それを受けて通産省資源エネルギー庁は、1990年より9年間の予定で3.5万KWのCAESシステムを建設し、その実証試験を行なうことになった。貯蔵施設は、炭坑の廃坑を利用し、約3万m³の貯蔵空洞を岩盤内に建設するものである。もしこれができれば、岩盤空洞に空気を貯蔵する世界で初めてのCAESシステムが誕生することになる。表1には、各国のCAESシステム開発計画を示す。

表1 各国におけるCAESシステムの開発計画

地点/会社	国名	出力	貯蔵タイプ	導入年	備考
Huntorf	西ドイツ	290MW	岩塩層	1978	運転中
Sesta	イタリア	25MW	滞水層	1988	試験中
Alabama Co.	米国	110MW	岩塩層	1991	運転中
Donbass (黒海北部)	ソ連	1050MW (350×3)	岩塩層		検討中
Pittsfield	米国		滞水層	1981~3	貯蔵試験
Cleveland Ele. Co.	米国	100MW	岩塩層		計画中
Los Angeles (SCE)	米国	50MW	岩塩層		検討中
Soyland	米国	220MW	岩盤空洞		検討中
Bretagne	フランス	250MW	岩盤空洞		検討中
Vianden	ルクセンブルグ	300MW	岩盤空洞		検討中
北海道	日本	35MW	岩盤空洞	1990~99	計画中

4. ニュータウン地域への CAES システム導入

CAES システムは、ガスタービン発電技術の一つである。通常のガスタービン技術とは、ガスタービンを駆動するに要する高圧空気が夜間に圧縮機で貯めた圧縮空気を利用している点で異なっている。それは、ガスタービン軸出力の全てを発電機出力にすることから、CAES の発電出力は通常のガスタービンに比べ2～3倍も大きくなる。都市型のコージェネレーションシステムとしてCAESを導入するには、需要家規模からみてガスタービンの容量はできるだけ小さいほうが好ましい。

現在、実用化しているガスタービンの発電出力は最小のもので1,000 KW 程度である。そのガスタービンをCAESシステムに転用すれば発電出力は2,500 KW にまで増大する。すなわち、CAES システムの導入は、最低でも2,500 KW の電力負荷をもつ需要家が必要となる。民生部門で2,500 KW の電力負荷をもちかつ熱需要の多い需要家は集合住宅である。それも、20～30 世帯といった個別集合住宅でなく、600 世帯以上の複数棟からなる集合住宅であ

都市型 CAES コージェネレーションシステムとその経済性
 る。また既に独自の熱供給システムをもつ既存建物に新たな熱配管を整備するのは難しく、その導入はこれから開発していくニュータウン計画に組み入んでいくのが望ましい。

CAES をコージェネレーションとして導入する場合は、発生する熱をできるだけ有効に利用するシステムを考えねばならない。そのためには、プラント規模は需要家のエネルギー使用形態を考えて決めなければならない。すなわちプラントはできるだけ定格出力で運転でき、かつ排熱も暖房・給湯、冷房負荷に合せて有効に利用したシステムとなる。ここでは、都市部の典型的なニュータウンについて、そのエネルギー負荷モデルにCAESシステムの供給電力と熱を配分し分析した。検討したニュータウン計画の規模とエネルギー負荷特性を以下に示す。

[ニュータウンモデル]

○住宅1,500 世帯

- ・・・契約電力6,000 KW (40 A×1,500 世帯)

○店舗、スーパーマーケット、学校、その他

- ・・・契約電力1,500 KW

図に示したニュータウンのモデルケースは、ピーク時の最大電力が7,500 KW ある。

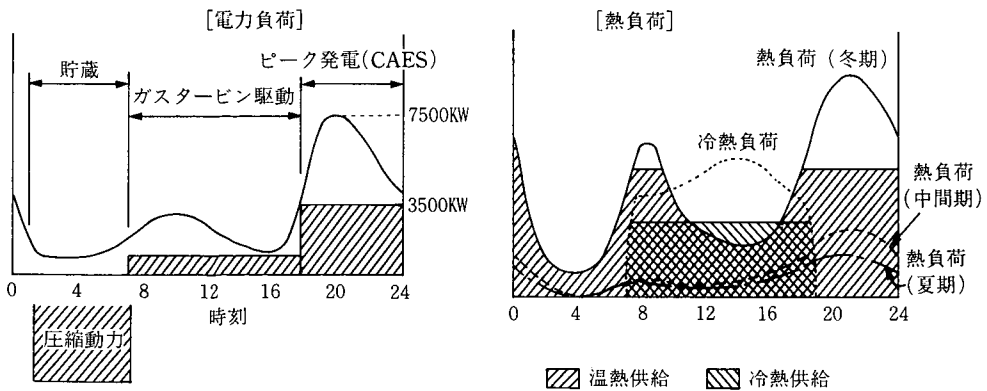


図 1 ニュータウンの負荷特性と CAES の供給形態

それに対して導入すに CAES は、できるだけ設備利用率を高く効率の良い運用を考えて、発電容量は 3,500 KW に設定した。また経済性を向上するため、発電設備の稼働率を高めた運転を考えている。それは深夜に貯蔵した空気をピーク時に使って発電する CAES システムと、それ以外の時間帯ではガスタービンと圧縮機を連結して発電する、所謂電力貯蔵と発電とのハイブリットで行なうものである。具体的には、夕方 18:00 から夜 24:00 までの電力ピーク時に貯蔵した圧縮空気を使ってガスタービンを駆動し、深夜 1:00 から朝 7:00 までのオフピーク時に圧縮機を稼働して高圧空気を貯蔵する。それ以外の時間帯 (7:00~18:00) は貯蔵空気を使わないでガスタービンを圧縮機と連結して発電する。

運転パターン：

1:00~7:00 (6時間)

圧縮機の駆動 (圧縮空気の貯蔵)

7:00~18:00 (11時間)

ガスタービン専用発電 (ガスタービン + 圧縮機)

18:00~24:00 (6時間)

CAES ガスタービン発電 (ガスタービン + 貯蔵空気)

ここでガスタービン専用発電とは、通常のガスタービンをいっており、それはガスタービン、圧縮機、発電機とが一体になったものである。この場合、ガスタービン軸出力の半分以上は圧縮機の駆動に消費されてしまうため、発電できる出力は 1,500 KW 程度である。ガスタービン専用運転のときは、再生器での空気予熱がないため、多量の熱が発生する。排熱は 500°C の高熱源であり、幸いなことに、その時間帯で夏は冷房負荷が、また冬は暖房負荷が卓越していることから、その排熱は夏期には吸収式冷房冷凍機を使って冷房用の冷熱を生産し、冬期は暖房用に利用することができる。実際の冷温熱負荷パターンに合わすため蓄熱槽を設ける必要もある。中間期の温熱需要が少なく電力負荷も比較的少ないときは、ガスタービン専用発電は止めて CAES 発電だけで運転することもある。図 1 には、こういった運転パターンで供給できる電力量と冷温熱量も示している。図の白い部分は、電気と熱の供給が必要負荷に対し足りなくなるところで、それに対しては系統電力の買電やボイラーや電動ヒートポンプによって供給量を確保する必要がある。図の電力負荷特性からみると、ピーク負荷だけを買電で補うかのように見えるが、それ以外の時間帯での

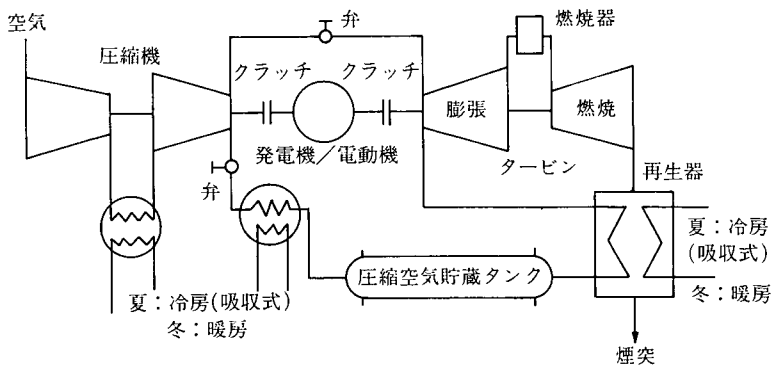


図 2 CAES システムの機器構成

買電もあるため、実際には CAES の導入によって電力の負荷平準化が図られていることが分かる。図 2 は、図 1 に示す負荷に対しての CAES システムの機器構成を示したものである。

5. 経済性

CAES システムは、既存技術の組合せでシステムが構成できる技術である。もちろん経済性を高めるには、発電設備と貯蔵設備のコストを低減する技術進歩が期待される。しかし近い将来の導入を考えると、在来技術によってシステムを構成せざるを得ない。その場合、システムは電気と熱の両方を供給するコージェネレーションとし、経済性を高めた導入を図る必要が

都市型 CAES コージェネレーションシステムとその経済性がある。

本研究は、温熱負荷が比較的卓越しているニュータウン地区を対象にそのエネルギー負荷をモデル化し、そこに CAES システムを導入したときその経済性が在来型のエネルギー供給システムに比べてどのようなになるかを分析したものである。経済性は、モデルエネルギー負荷に対し、在来方式に等しい年間費用で CAES システムを導入したときの発電設備と貯蔵設備の費用の関係を分析している。検討に用いた需要家の用途別エネルギー負荷と発電設備の運用パターンは、前節で述べたニュータウン計画モデルで設定した条件を使っている。また発電システムの設備構成は、以下に示す通りである。

<p>[用途]</p> <p>電 気 (照明, 動力)</p> <p>冷 房</p> <p>暖房・給湯</p>	<p>[在来方式]</p> <p>系統電源</p> <p>空冷電動ヒートポンプ (COP=3.5)</p> <p>ガスボイラ</p>	<p>[CAES 方式]</p> <p>ガスタービン発電</p> <p>発電効率(専用: 26.9%, CAES: 24.2%)</p> <p>吸収式冷凍機 (二重効用 COP=1.26, 単効用 COP=0.7)</p> <p>排熱回収ボイラ</p>
---	--	--

表 1 3,500 kW 級システムの設計仕様

貯蔵圧力 [ata]	貯蔵流量 [kg/s]	貯蔵時間 [h]	放出流量 [kg/s]	発電時間 [h]		タービン入口	
				専用	CAES	1 段(膨張)	2 段(燃焼)
80	6	6	6	10	6	38 ata×300°C	8.7 ata×950°C

表 2 検討方式のガスタービン性能と熱供給量

	出力 [KW]	電力量 [KWH/日]	所要燃料 [KG/s]	発生熱量 [Mcal/日]		
				夏期 冷房	冬期 給湯	冬期 暖房・給湯
ガスタービン発電						
(1) CAES システム	3,500	21,000	0.13	5,185	—	4,935
(2) ガスタービン専用 圧縮機駆動	1,500 4,060	15,000 24,360	0.13 —	34,881 10,371	— 6,225	28,129 20,321

表1には、検討したCAESシステムのガスタービンについて主な設計仕様を示す。

検討した空気貯蔵は変圧式であることから、ガスタービン入口圧力は発電時に圧力を下げて使うことになる。この場合、ガスタービンの発電時間を6時間とすると、貯蔵容量は80 ataで3,120 m³になる。検討の結果得られたCAESガスタービン性能と熱供給量を表2に示す。

経済性の計算は、固定費と可変費の和である年間総費用が在来方式とCAES方式とで等しくなるようにして、CAESの発電設備と貯蔵設備の建設費の関係を分析した。熱供給については、圧縮機とガスタービンの通常の定格運転で発生する排熱を利用して、夏期は冷房用冷熱と給湯用温熱を200日分供給し、冬期は暖房・給湯用温熱を100日分供給できるものとしている。年間総費用を計算するために用いた前提条件は次の通りである。

電気料金：基本料金 1,510 円/KW，従量料金
 (夏期) 17.41 円/KWH
 (冬期) 15.83 円/KWH
 夜間蓄熱調整契約 (PM 10:00～AM 8:00) 4.44 円/KWH
 夏期昼間定期調整割引 (7, 8, 9月 PM 1:00～PM 4:00) 725 円/KWH

建設単価 (従来システム)：

空冷電動ヒートポンプ 20万円/RT/H，受変電設備費 3万円/KVA
 暖房用ボイラ 1万円/Mcal/H

燃料費：軽油 8.01 円/Mcal (70 円/リットル)
 年経費率：発電設備 18%，貯蔵設備 13%

以上の前提条件を基に、検討システムについて、その経済性を試算した。経済性は、年間総

費用を在来方式とCAESについて計算している。また運転方式に関しては、ピーク負荷時間帯にだけ運転する場合と、それ以外の時間帯にガスタービンも駆動するピーク/ミドル運転の両方について検討している。表3にその結果を示す。

表3 在来方式とCAESシステムの経済性

	運 転	年間総費用 [万円]	
		固定費	可変費
在来方式	ピーク	4,020	19,904
	ミドル	12,195	34,769
CAESシステム	ピーク	630 C ₁ + 0.13 C ₂	10,183
	ミドル	630 C ₁ + 0.13 C ₂	20,767

C₁：発電設備費 [万円/KW]
 C₂：貯蔵設備費 [万円]

図3は在来方式の年間費用に等しいCAESシステムのブレークイーブン費用を、横軸に発電設備費を縦軸に貯蔵費用をとって表したものである。図からCAESシステムを建設する際に、発電設備と貯蔵設備に投入できる費用を見積もることができる。

表4は、その結果の一例として発電設備費を10, 20, 30万円/KWとし、それに対する貯蔵費用を示したものである。発電設備費はまだ建設実績がないため正確な値は分らないが、一般に、大型プラントの場合でみると熱供給設備を除いて8～10万円/KW程度である。それに対

表4 CAESシステムの発電設備費と貯蔵設備費

発電設備費 [万円/KW]	運用方法	貯蔵設備費	
		[億円]	[万円/m ³]*
10	ピーク	5.8	18.6
	ミドル	15.3	49.0
20	ピーク	1.0	3.2
	ミドル	10.5	33.7
30	ピーク	—	—
	ミドル	5.7	18.3

* 貯蔵容量 80 ata の単価

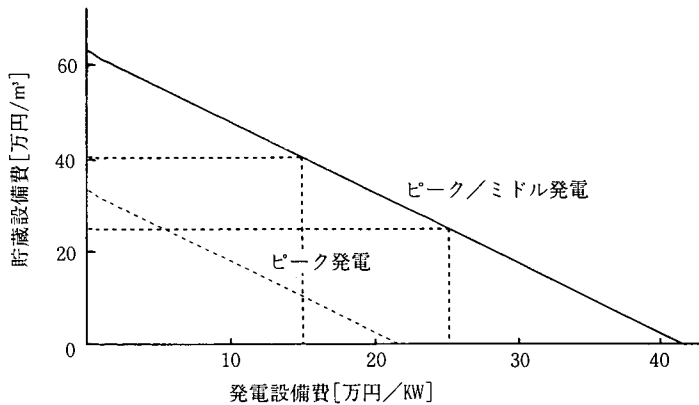


図 3 CAES システムの発電設備費と貯蔵設備費との関係

し、小型になるはスケールデメリットからやや高くなることが予測され、その値は熱貯蔵設備も含めて 15~25 万円/KW と考えられる。その値から貯蔵設備費を求めると、ピーク発電専用では 11 万円/m³ 以下にしなければならず、経済的に成立するには厳しい値である。しかし、ミドル発電システムで運用すれば 26~46 万円/m³ と、発電設備の利用率向上と熱の有効利用とによって経済性が高まることが明らかになった。

6. おわりに

電力貯蔵技術は、負荷を平準化し、供給の信頼性を向上する働きがある。その働きは、原子力発電の設備が増え、その電気が利用できるようになったときに最大に生かされる。しかし最近の原子力発電所の立地難を考慮すると、オフピーク時に原子力発電所の余剰電力が発生するのはかなり先のことである。原子力発電による貯蔵は、原子力発電の電源構成シェアが設備で 33%、電力量で 53% に達すると必要になる。電源計画モデルを用いて我が国全体の電源構成から想定した結果によると、その時期は 2015 年以降である。それまで余剰を出せる電源は、

今世紀中には LNG 火力であり、来世紀初期にそれが石炭火力に代わる。もちろんこの時期は電源構成が異なる電気事業によって違ってくる。実際の導入時期は各社別に推定しなければならない。

貯蔵に使う電気が LNG 火力であれば経済的でないし、石炭火力であれば CO₂ 削減にならない。それを解決するには、プラントのシステム効率を高めなければならない。その方法に、排熱を有効に使うコージェネレーションシステムがある。都市型 CAES システムは電力負荷を平準化する電力貯蔵技術であるが、同時にニュータウンなどエネルギー需要地に立地することで熱供給を行なう地域コージェネレーションシステムである。

今回の検討でシステムの経済性は、在来方式に比べてピーク運用ではやや厳しいものの、ミドル運用で行なえば成立し得ることが明らかになった。しかし可変費だけで見れば、ミドル運用でも費用は在来方式に比べて半分程度になるため、変動分の年経費は節約できる。

システムは、エネルギーの有効利用、ピーク負荷の削減による負荷率の改善、都市の環境改善などに大きく役立つものである。また貯蔵し

た圧縮空気は、発電だけでなく水質浄化、空調、ビルのエアカーテンなど付加価値を高めた様々な用途が考えられる。今後の課題としては、ガスタービンのシステム効率の改善、より安価な貯蔵設備の開発、需要家のエネルギー負荷特性を更に詳細に調査すると同時に、高压空気の貯蔵タンクに関する制度問題についても検討していく必要がある。

[参考文献]

- [1] 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。
- [2] 内山洋司, 吉川喜郎, “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。
- [3] 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。
- [4] 内山洋司, 角湯正剛, “圧縮空気貯蔵発電システムの利点と経済性”, 電力中央研究所研究報告 Y90002, 1990。

(うちやま ようじ
経済部エネルギー研究室)