液体空気利用発電装置の開発

Development of Generator of Liquid Air Storage Energy System

名古屋誘導推進システム製作所　岸本健治[*1]　長谷川恵一[*2]
浅野高久[*3]

液体空気利用発電システムは，安価な夜間電力で製造した液体空気を，昼間に発電装置で昇圧，気化，燃焼させて発電を行う新しいタイプの発電システムである．液体ロケットエンジン技術を応用したシステムは，始動装置不要，高効率，電力の負荷平準化に有効といった特徴を持つ．今回，発電装置のパイロットプラントを設計・試作し，試験により，始動特性，定常安定性等を確認し，システムとして成立するための主要開発項目を実証した．また，高効率化への課題を明確にし，実機のめどを得た．

Liquid Air Storage Energy system (LASE) is an innovative power generating system which stores energy as liquid air by using cheaper electricity at night, and generates during the day by combusting pressurized and vaporized liquid air. LASE, based on liquid rocket engine technology is starter-less, more efficient, and enjoys power balancing. A pilot plant of generator of LASE was desigend and demonstrated such key technology as its starting and stability characteristics. As a result, by finding how to improve its performance, the feasibility of the system was confirmed.

1. まえがき

電気事業法の改正に伴って，電力売買の自由化が促進されつつある．このような背景の中，電気エネルギーの供給方法に関しては，既存の大規模・集中型発電システムに対し，小規模・分散型発電システムが，経済性，機敏性等の観点から注目されてきている[(1)]．

当社では，数年前から既存の液体ロケットエンジン技術を応用した新製品を開発中であり，特に液体空気利用ガスタービン吸気冷却システムは，中部電力(株)との共同研究で良好な成果を収め[(2)]，現在では実証試験の段階にまで達している．この吸気冷却システムは，夜間の安価な電力を利用して液体空気（以下，液空と称す）を製造し，夏場の昼間の電力需要ピーク時にガスタービンの吸気口に液空を噴霧することでガスタービンの吸気温度を下げ，出力向上をねらうものである．これに対し，液体空気利用発電装置［以下，液空発電装置（LASE）と称す］は，製造した液空を噴霧するのではなく，駆動空気として使用して発電を行うものであり，前述の分散型電源として有効な製品である．

本報では液空発電システムの紹介並びに平成7年6月～平成9年3月の期間に実施した発電装置の開発試験の結果について述べる．

2. システム概要

2. 1　システム系統及び作動原理

液空発電装置は，図1の系統図に示すように，液空貯蔵タンク，ターボポンプ，熱交換器，発電タービン等の機器を配管及びバルブ類でそれぞれ接続した，液体ロケットエンジンのようなシステム系統で構成される．

本装置の作動原理は以下のようになる．

① タンクから出た液空はターボポンプで昇圧される．

② 大気熱交換器で大気の熱を吸収し，常温ガスとなる．

③ さらに，再生熱交換器でタービン排気ガスと熱交換し，常温よ

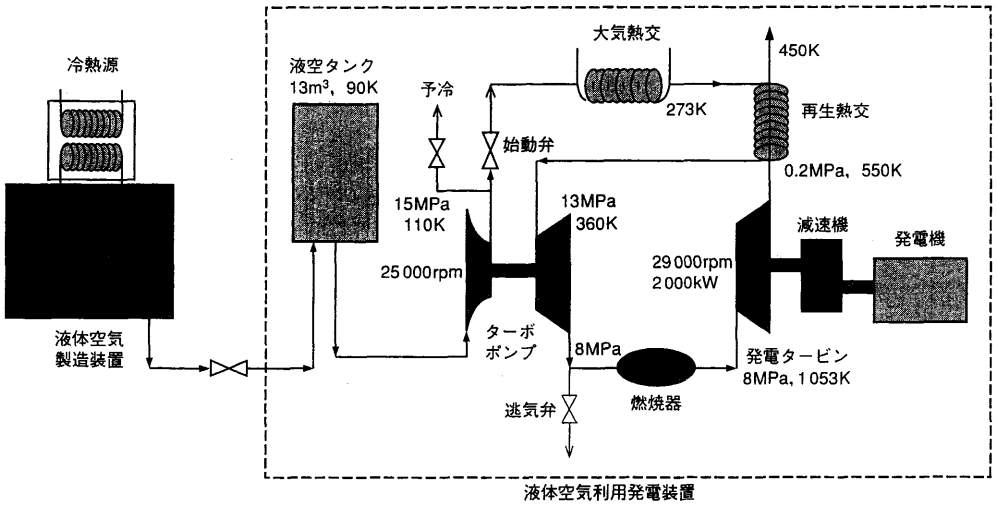


図1　液体空気利用発電システム系統図　液空発電システムを構成する機器，配管類を示す．数値は，パイロットプラントの主要諸元を示す．
Schematic of LASE

*1 エンジン・機器部主管
*2 エンジン・機器部液体ロケットエンジン設計課長 工博
*3 エンジン・機器部液体ロケットエンジン設計課

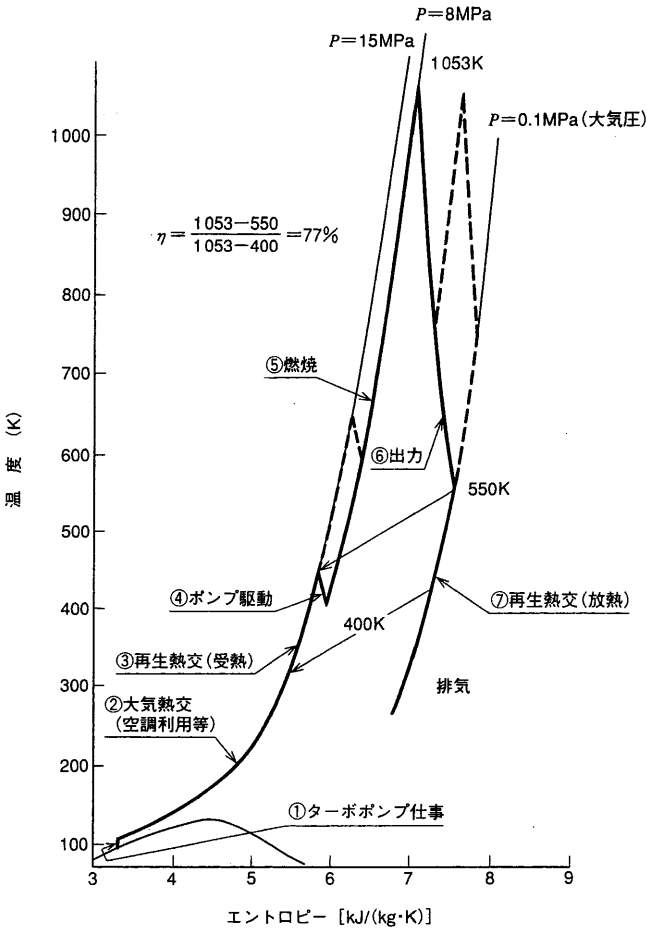


図2　液体空気利用発電装置作動原理 T-S 線図　液空発電装置の作動原理を表す T-S 線図を示す．点線は燃焼器を2段化，高温排気ガス利用により，更に高効率化したケース．
T-S diagram of generator of LASE

り高温のガスとなる．

④ ターボポンプを駆動し，燃焼器へ入る．

⑤ 燃焼器では燃料との混合，燃焼により高圧・高温ガスを生成する．

⑥ この燃焼ガスで発電タービンを駆動し，発電を行う．

⑦ 発電タービンを出た後の排気ガスは，前述の液空から気化直後の常温・高圧の空気に熱を与えた後，排気サイレンサを通って外気へと排気される．

以上の過程を T-S 線図に表すと図2のようになる．発電サイクルの熱効率は⑤と⑥の比で表され，図から分かるように，77％程度の高い熱効率が得られるシステムである．

2．2　液体空気発電装置の特徴

上述の作動原理，系統図から液空発電装置は以下の特徴を有している．

(1) 始動装置が不要

液空の気化・膨張によりシステムを立ち上げるため，始動装置は不要である．ただし，始動前にはポンプ部の予冷が必要である．

(2) 出力効率が高い

タービン損失以外のエネルギーを発電出力として取出せるため，出力効率（η＝出力/投入した燃料のエネルギー）が高い．

(3) 冷熱の有効利用が可能

液空を気化する際の放熱はエンクロージャ冷却，空調，液ガス製造用冷熱源等に利用でき，冷熱の有効利用が可能である．

(4) 低 NOx

高圧作動タービンを使用し，燃焼温度を低く抑えるため，NOx の排出量が少ない．

(5) 液空の貯蔵量により運転時間の制約

液体として貯蔵されている空気を消費するため，運転時間はその貯蔵量により決定される．なお，空気を液体として貯蔵するため，エネルギーを圧縮空気の形で貯蔵し，これを利用して発電するシステムである CAES (Compressed Air Energy Storage) のように大型の空気貯蔵施設を必要としない．

(6) 負荷平準化に有効

夜間に液空の製造を行いエネルギーを液空の形で貯蔵しておき，需要の多い昼間に発電するので，氷蓄熱や揚水発電と同様の電力の負荷平準化に寄与できる発電システムである．

2．3　パイロットプラントの設計・試作

液空発電装置の実証を目的として試作したパイロットプラントの主要諸元を図1に，外観を図3に示す．液空タンクは容量 13 m³ で，最大約 30 min の運転が可能である．大気熱交換器は，今回は熱交換のみで冷熱の利用は行っていない．ターボポンプと発電タービンは液体ロケットエンジンの技術を利用して，図4に示すように同出力クラスのガスタービンエンジンと比較して，非常にコンパクトに製作した．発電機は三菱電機製の 2 600 kW 級のものを使用し，発生した電力は水抵抗器で消費した．

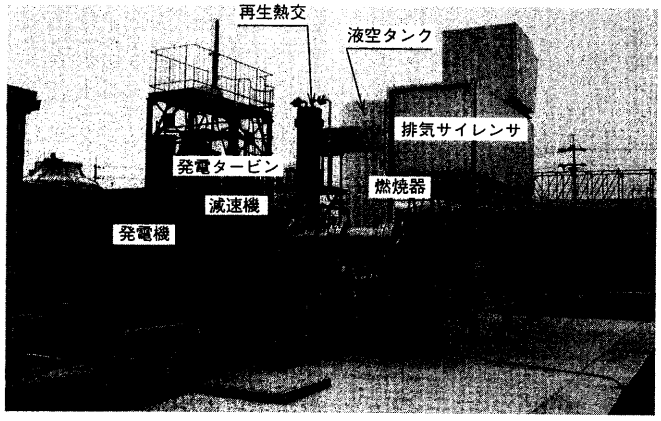


図3　パイロットプラント外観　実証試験用に試作したパイロットプラントを示す．
Pilot plant of generator of LASE

3．パイロットプラントによる開発試験

3．1　試験方法

本試験は，液空発電装置のシステムとしての作動特性の確認を主目的とし，具体的には以下の項目を確認することとした．

- システムの速やかな立ち上がり（良好な始動特性）
- 定常安定性（負荷変動に対する応答性）
- システム及び機器の性能
- 一連の運転手順の確立

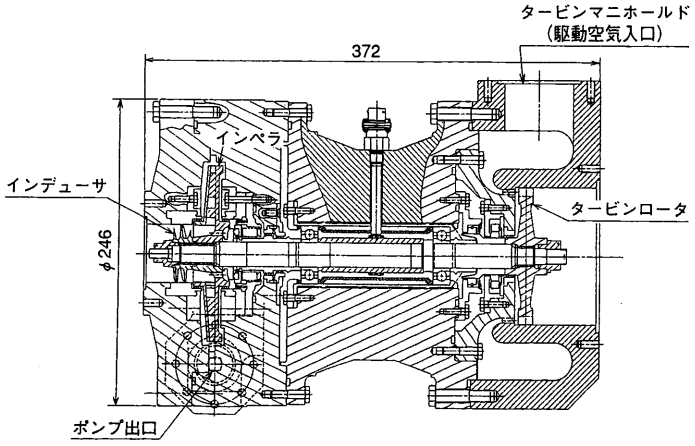
そこで，パイロットプラントを用いて以下の順で試験を行った．

(1) エキスパンダ始動試験

液空を全系統ラインに流しシステムを立ち上げ，着火条件を決定する．

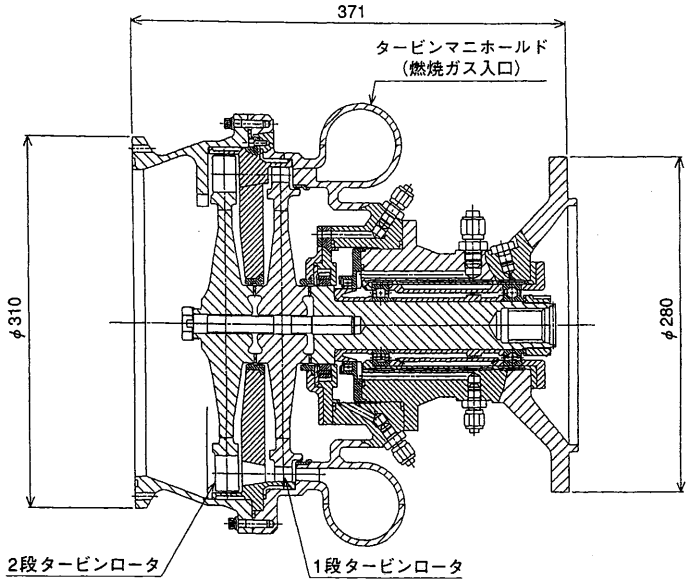
(2) 着火試験

エキスパンダ試験の結果を基に燃料を噴射し，安定な着火を確認する．



ポンプ吐出圧力：150kgf/cm², タービン入口圧力：130kgf/cm²
流量：4kg/s, 回転数：25 000rpm

(a) 液空ターボポンプ



タービン入口圧力：80kgf/cm², 温度：1053K
流量：4kg/s, 回転数：29 000rpm

(b) 発電タービン

図4　液空ターボポンプ及び発電タービンの構造
Schematics of turbopump and generating turbine

(3) 無負荷運転試験

着火後発電機の負荷を掛けずにしばらくの間運転する.

(4) 負荷運転試験

発電機の負荷を掛け，応答性等を確認する.

液空の酸素含有率は最初は空気と同じであるが，断熱性の良い貯槽をもってしても長期間の保存では窒素が多く蒸発し，酸素濃度が大きくなる．今回はこのような状況に応対することを考慮し，種々の酸素濃度を作ることになり，試験で使用した液空は液体窒素 LN_2 と液体酸素 LOx を混合して作った.

3．2　試験結果

3．2．1　始動特性

エキスパンダ始動試験で得た着火条件で着火試験を行い，良好な結果を得た後，燃焼状態の保持を試みた．ところが，時間が経過するにつれてターボポンプ，発電タービンの回転数が急激に下がっていき，終りにはシステムがパワーダウンするという現象が起った（図5参照）．これは着火後の温度の急上昇で発電タービンのノズルスロートでのチョーク条件が急激に変化するため，空気

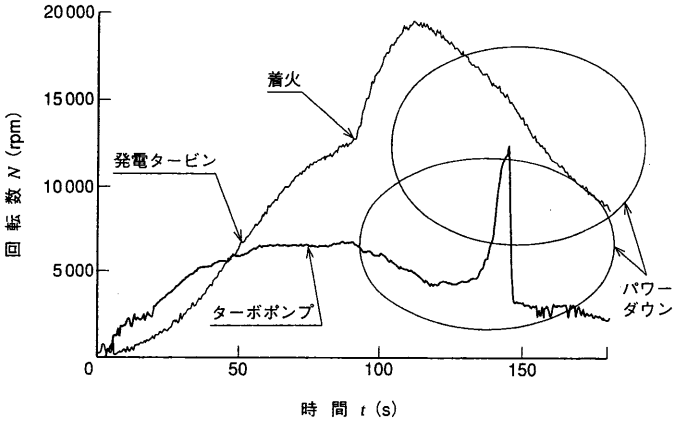


図5　着火後のパワーダウン　着火後にシステムがパワーダウンした様子を表す回転数の時間変化を示す．ターボポンプは吸込不良により空回りしている.
Power down of system after ignition

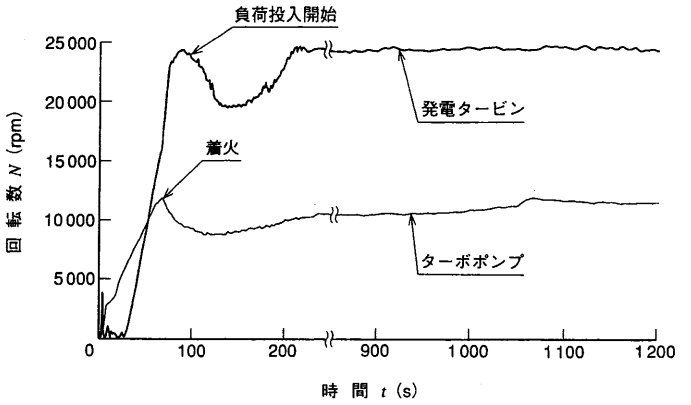


図6　定常運転状態　システムが立ち上がり，定常状態に移行した後，安定性を維持している様子を，ターボポンプと発電タービンの回転数で表している.
Operation in steady state

の流れがせき止められるような形になり，上流のターボポンプのタービン出口部に背圧が立つことが原因であることが分かった．そこで，ターボポンプタービン下流と燃焼器入口の間に逃気弁を設け（図1参照），ここから空気を過渡的に一部逃気したところ，目標とする速やかな立ち上がりが実現できた（図6参照）．始動時間は始動バルブを開にしてから約90 s で，再現性も良好であった.

3．2．2　定常安定性

図6にシステムの作動状況として発電タービンの応答性を示す．図では着火後に一時発電タービンの回転数が下がっているが，これは始動時の燃料制御が手動によるもので，負荷変動に十分に対応できなかったこと，負荷の掛け始めで負荷を手動で一定に保つことが難しかったことにより，応答性が遅くなったものである．その後は負荷を多少変動させても良好な応答性（安定性）を示している.

本システムではシステムの制御は，燃料制御→再生熱交高温側入口条件変化→ターボポンプタービン駆動ガス条件変化＝高圧空気条件変化→システム制御という方式で行われるため，一般のガスタービンと比較して応答性は遅いと予想される．加えてパイロットプラントでは配管がかなり長くなったので，制御特性は更に悪くなると思われたが，結果的にはそれほど大きな影響を受けるまでに至っていない.

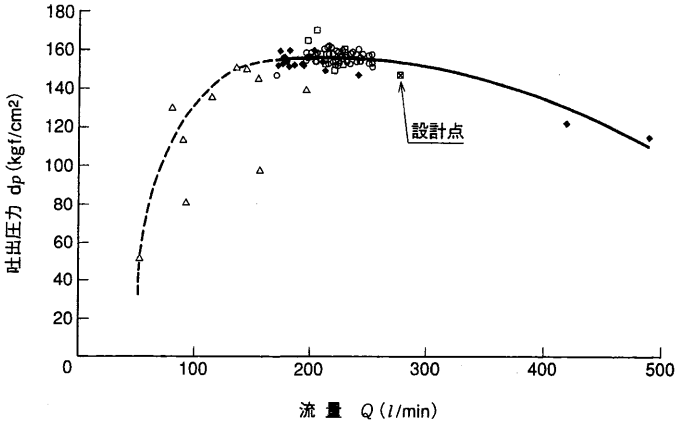


図7　ターボポンプ圧力一流量特性（H-Q 曲線）　ターボポンプの吐出圧力と流量の関係を表す特性曲線で，試験結果はほぼ設計どおりの特性を示している．
H-Q characteristic of turbopump

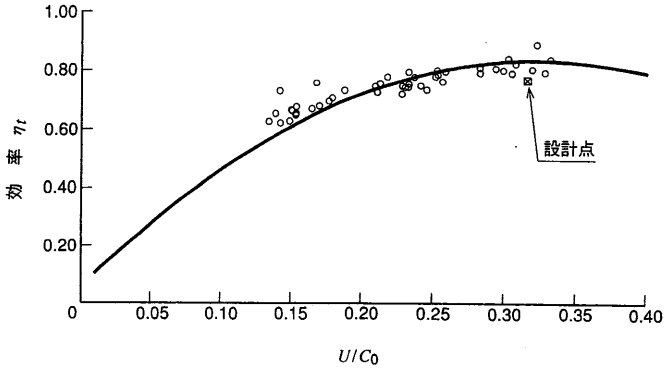


図8　発電タービン効率　発電タービンの速度比（ロータ周速 U と断熱理想速度 C_0 の比）－効率曲線を示す．試験結果は設計点を上回る高効率を示した．
Efficiency of generating turbine

3．2．3　機器の性能

(1) ターボポンプ

図7はポンプの圧力一流量特性曲線（H-Q 曲線）である．ただし，圧力上昇値はポンプの相似則を用いて設計回転数に換算した値を使用している．本結果からターボポンプはほぼ設計どおりの性能を示していることが分かる．図中の流量が小さい領域に見られるばらつきは，システム立ち上げ時のパワーダウンでポンプが吸込み不良を起したときのデータである．

(2) 発電タービン

発電機駆動に使用したタービンは，圧力比37.9，2段の圧力複式タービンである．通常の発電用ガスタービンとは違い，高圧で作動するタービンであり，小型化を主眼としたので効率はそれほど高くない．**図8**は，試験結果から得た発電タービンの速度比一効率曲線であるが，本タービンの効率は設計点を上回っており，良好な作動状態にあったことが分かる．高圧作動タービンの高効率化は，システム全体の効率アップに少なからず影響するので，本結果は重要な成果である．

4．今後の展望

実証試験では致命的な不具合はなかったものの，実機に対する種々の課題を得た．今後はこれらの課題の対処法検討が最優先事項である．中でも，実証プラントでは，設置場所の制約から配管の長さが70 m 以上になり，予想を上回る圧力損失が問題となった．実機では今回の試験結果，及び現在設計中の中部電力(株)向け液空利用ガスタービン吸気冷却システムの経験を生かし，対処する．

実機開発の際には，システムの更なる高効率化を検討中である．発電タービン入口温度を上げると空気流量を減らすことができ，液空消費量の低減とシステムの高効率化が同時に達成できる．しかしこの場合，低 NOx の対策が必要となる．そこで，燃焼器を2段（実証プラントでは1段）設置し，1段目の発電タービンから出た後の燃焼ガスを再熱後，2段目の発電タービンを駆動する方式を検討中である．本方式により，図2の T-S 線図に点線で示すように発電サイクルの熱効率向上となり，出力効率も向上する．ただし，タービン段を増すことでコストが高くなるため，トレードオフが必要である．また，冷熱源の有効利用による高効率化も検討中である．具体的には，冷熱源のエンクロージャ冷却や空調としての利用である．

今回のパイロットプラントでは発電装置の開発のみを行ったが，液化ガス会社のような液化施設を保有する場合を除いては，液空発電装置は液空製造装置と組合せた形で一つのシステムとして成立する．液空製造装置は実用段階にあり，今後は発電装置と組合せての実証に移行する計画である．

5．むすび

液空発電装置の開発を目的とし，設計・試作，試験を行った．開発試験では，システムの良好な始動特性，定常安定性等を実証し，一連の運転手順を確立した．試験から得た課題は基本的にどれも対処可能であると考えられ，実機のめどを得ることができた．

参考文献

(1) 茅　陽一ほか，地球時代の電気エネルギー，日経サイエンス社 (1995)
(2) 岸本健治ほか，液体空気利用ガスタービン吸気冷却システムによる出力向上，三菱重工技報　Vol.34　No.1 (1997-1)