

## 小特集 核融合炉システムに必要な電力変換・エネルギー蓄積技術

# 3 . ここまで来た大型電力設備の性能と将来展望

## 3 3 力学エネルギー蓄積装置 - フライホイール, 圧縮空気 -

嶋田 隆一  
(東京工業大学)

Performance of Large Electric Power Equipment and Future View  
Kinetic Energy Storage (Flywheel, Compressed Air Energy Storage)

SHIMADA Ryuichi

*Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8550, Japan*

(Received 12 April 2004)

Kinetic energy has been the energy well known since ancient times. The generator with a flywheel is an electric power amplifier that stores electric power and is made to generate large electric power at the short time, and used to be in a nuclear fusion institution. In recent years, the flywheel has been recognized an electric power tool for power stabilization. An example of application in the industry and in an electric power community is introduced. In addition, a characteristic application is developed despite the fact the energy efficiency of compressed air energy storage is generally poor.

Keywords:

flywheel, energy storage, motor-generator, CAES, ROTES

### 3 3.1 フライホイール, 原理が簡単で長寿命

運動エネルギーによるエネルギー蓄積の利用はかなり古い。簡単な蓄勢を利用した斧や木槌はもちろん、回転運動を利用したこま、車輪など、道具の歴史の中でもっとも古いと想像される。石器時代の遺跡からはみ車の効果を利用したと思われる穴あけ機や火起こし機が発見されている。フライホイールは古くから利用されてきた。はずみ車は、今でも、エンジンや産業機械に盛んに使われている蓄勢装置と呼ばれるものである。しかし、フライホイール効果をエネルギー蓄積のために単独に使う装置はほとんどなく、これまでフライホイールは日陰の存在であった。こうした状況にあって、産業用として鉄鋼や電鉄分野では継続的に使用されてきた。また、核融合や粒子加速器のように瞬間的な大電力を使用する特殊な用途では、フライホイールの利用はめずらしくはなく、断続的に開発が進められてきた。特に我が国では核融合実験施設用に現在でも世界最大である蓄積エネルギー 8 GJ(2,200 kWh)のフライホイール付電動発電機が1985年に製作され、すでに20年近い運転実績がある。

フライホイール電力貯蔵は電力負荷平準化、電力系統の安定度・信頼度を向上する電力貯蔵技術として、現状技術で実現可能な方法として注目されている。それは、日本で開発された大容量可変速揚水発電技術と、核融合で建設された大容量フライホイール技術とが融合して、産業電力分

author's e-mail: rshimada@nr.titech.ac.jp

野にも適用可能な電力貯蔵装置となっている。近年、重要性が増した太陽光発電、風力発電など分散型電力システムの電力平準化装置、電力系統障害除去装置としての可能性が注目されている。これは、周辺技術として近年の低価格なインバータ・コンバータ、マイコン制御が実用化され、小型化と運転の効率化、最も重要な、起動・停止等の運用の容易さが著しく改善されたことによる。いわゆる、「いまさら、回転機械ですか」の疑問に十分答えるだけの環境が整ってきたのである。

また、世界的に見れば、システムを支える技術が特別に高度でもないことから、開発途上国の弱小系統の電力問題を解決する電力機器として、その機械のタフさに大きな期待が寄せられている。さらに、新材料、磁気浮上技術、超伝導技術、高速電動発電機の技術などの進歩により、新しい応用のフライホイールが生まれようとしている。

### 3 3.2 フライホイールの長所

#### (1) エネルギー密度

フライホイールとはその名のように本来はホイール(輪・車輪)形状をしており、スポークで回転体(リム)と軸(ハブ)を支えたものである。回転体は周速  $V$  で回転すると遠心力が半径方向に生じる。この力をリムの引っ張り応力  $\sigma_t$  で持つとリムには  $\sigma_t = \rho V^2$  ( $\rho$  は密度)の応力がかかる。蓄積されるエネルギー  $E$  は  $E = MV^2/2$ ,  $M$  はリムの全重量

であるから、リムの半径  $r$  とすると  $E = \pi r S \sigma_t$  ここで  $S$  は断面面積。したがって、蓄積エネルギー量はエネルギー蓄積体であるリムの体積  $\times$  張力で決まることになる。すなわち、張力限界まで使用すると材料の密度によらないのは、重いほうが良いかと思う人間の感覚と異なるところである。高張力に耐える材質として、FRP、ケブラーなどの新材料開発がフライホイールにとって、他のエネルギー蓄積方法にない大きな体積・重量あたりのエネルギー密度を可能にした。エネルギー蓄積手段のエネルギー密度はFRPでは  $1 \text{ kJ/cm}^3$ 、鋼鉄では  $250 \text{ J/cm}^3$  が得られるが圧縮空気は  $20 \text{ J/cm}^3$ 、磁界は  $20 \text{ J/cm}^3$ 、電界ではさらに低く  $0.2 \text{ J/cm}^3$  程度である。フライホイールは圧縮空気、磁界、電界に比べ高い密度でエネルギーを蓄積することができる。

回転体の回転損失は、軸受け損や風損が主である。一般にこまの例でわかるように、半径の大きな回転体ほど長く回り続けることを知っている。フライホイールには、エネルギーの増大の方が損失の増加に勝るスケール効果がある。エネルギーは3乗で増え、損失は1から2乗で増えるからである。次節で述べる核融合用の世界最大のフライホイール(蓄積エネルギー 8 GJ)は回転数減衰の時定数が約 1,600 秒で、自然減速の場合、完全に止まるまでは数時間かかる。化学作用を使う2次電池は、密度も大きい、高速での充電・放電は内部抵抗による充電効率低下と大出力が出せない問題がある。

## (2) 材質と形状

以上の結果から、蓄積エネルギー密度の限界は回転速度も含めて、エネルギー蓄積体であるリムの張力限界で決まる。すなわち、フライホイール材料は抗張力の大きな材料を使用することが必要で密度  $\rho$  が大きくとも重量が増すだけで大きなエネルギーにはならないことがわかる。高張力に耐える材質として、FRP、ケブラー、ガラス繊維などの新材料が発展し、フライホイールに新しい可能性をもたらしつつある。また細線を巻いたものをフライホイールに使用すると材料の破壊強度が増して有利である。エネルギー密度は同じでも軽い方が材質では速い周速になる。同じ応力でもガラス、カーボンの方が鋼より数倍高速である。結局、エネルギー密度をあげるには、高張力に耐える材質を選ぶべきである。高張力なマレージング鋼の場合、 $170 \text{ kg/mm}^2$ 、ガラス繊維でも特に強力なS ガラスの場合、 $250 \text{ kg/mm}^2$ 、カーボン繊維では  $700 \text{ kg/mm}^2$  からさらに強力なものも製造できるので  $\text{kJ/cm}^3$  も可能である。

またシステムとして考えれば、磁界エネルギー等の場合に比べ、フライホイールは構造物そのものが蓄積体となるので容器など周辺機器の体積を入れた全体平均密度の比較ではさらに有利となる。

## (3) フライホイールのエネルギー蓄積放出効率

回転体の回転損失は軸受損と風損が主である。エネルギーの蓄積量  $E_s$  とそれを維持するに必要な電力(回転損失 + システムの維持電力)との比をエネルギー蓄積時定数  $\tau_s$  (エネルギー閉じ込めまたは減衰時定数ともいう)と定義すると充放電一周期の出力エネルギー  $E_{out}$  と入力エネルギー  $E_{in}$  の比であるエネルギー効率  $\eta_e$  は

$$\tau_s = E_s / P_{loss} \quad (1)$$

$$\eta_e = \frac{\eta_{in}}{\eta_{out}^{-1} + \frac{TE_s}{\tau_s E_{out}}} \quad (2)$$

$\eta_{in}$ 、 $\eta_{out}$  は電力と蓄積体との充電・放電変換効率で  $T$  は運転周期である。

この式によって、コンデンサから揚水発電所まで、スケールが何桁も異なるエネルギー貯蔵システムに要求される性能がよく示される。 $\eta_{in}$ 、 $\eta_{out}$  は電力から蓄積装置への変換効率でこれが良くなければ電力蓄積はできない。フライホイールの場合、発電機・電動機の効率であり、同期電動機を想定すれば、電気-機械の変換効率はほとんど1に近い。(2)式の分母の第二項、エネルギー蓄積時定数  $\tau_s$  と周期  $T$  との比が効率を決めることになる。すなわち、 $T$  が短い場合は、時定数  $\tau_s$  は短い、すなわち維持パワーの大きなエネルギー貯蔵システムでもエネルギー効率を高くすることができる。これは  $\eta_{in}$ 、 $\eta_{out}$  が十分高いフライホイール貯蔵の特徴で、短周期の負荷平準化装置に向いていることを示す。次節で述べる核融合用の世界最大のフライホイール( $E_s = 8 \text{ GJ}$ )は  $\tau_s$  が 1,600 秒で、このようなフライホイールを100秒周期の鉄鋼圧延プラントの負荷変動(ピーク 85 MW)を平準化するのに使用した場合、95%のエネルギー効率になることが試算されている。この蓄積時定数と周期、そしてエネルギー効率の考え方は、スケール効果を見失いがちな電力貯蔵システムの有効な評価法となるものである[1]。

## (4) フライホイール電力貯蔵の利点

フライホイールは古くから利用されてきた歴史を持ち、電力利用の急増化、特殊化の状況にあって、電力負荷平準化、電力システムの安定度を向上する電力貯蔵技術として、またすぐにでも実現可能な電力技術として脚光を浴びつつある。その理由は、

我が国では日本原子力研究所核融合実験施設に磁界コイル電源用の世界最大の蓄積エネルギー 8 GJ (2,200 kWh)のフライホイール付き発電機がある。ここではすでに数万回以上の運転回数と10年以上の運転実績がある。

近年の高度な半導体電力変換技術、計算機制御技術が適用され小型化と運転の効率化そして運用の容易さが著しく改善された。

発電機と一体構造で電気的入出力が容易である。

消耗する部品がないため寿命は最大応力と疲労で決まるが、設計上半永久的と言える。また、リサイクル可能な材質で作れる。

小形であることを生かして、小規模なエネルギー貯蔵装置として分散型の電力平準化装置、電力系統障害補償装置としての可能性を持っている。

以下、我が国のフライホイールによる電力貯蔵技術の現状と開発動向等について述べてみたい。

### 3.3.3 フライホイールの現状

#### (1) 核融合用電動発電機

日本原子力研究所にて開発された世界最大のフライホイール付電動発電機は臨界プラズマ試験装置「JT-60」の電源設備の一つである。JT-60 電源は高頻度繰り返し運転を行う大電流・大電力のパルス状電力負荷で、供給すべき全エネルギー（8 GJ）を商用電力系統から直接受電したならば、電力系統の周波数変動あるいは電圧変動といった受電条件を満足することができない。そこで、この問題を解決するため、受電条件の許す限度までを直接受電する方法でまかない、不足する分をフライホイール付発電機でまかなうというシステムが設計された。発電機が放出すべきエネルギーは、4 GJで、容量は215 MVAである。フライホイール付電動発電機の断面図を Fig. 1 に示す。

回転の加速は発電機自身が電動機になるサイリスタスタータ方式(19 MW)で、約6分で回転数70%から100%へと加速できる。エネルギーの放出は30秒で100%から70%へと回転数が減少する間、ピーク 160 MW が発電される。1985(昭和60)年4月から実用運用を開始し、すでにエネルギー充放電10,000回を超え、積算運転時間は5,000時間にも及ぶが、5年目に行った総点検でフライホイールの分解点検が行われたが異常はなく、設計(十万回の繰り返し寿命)のとおり長寿命運転できることがわかっている[2]。

#### (2) 電車への応用

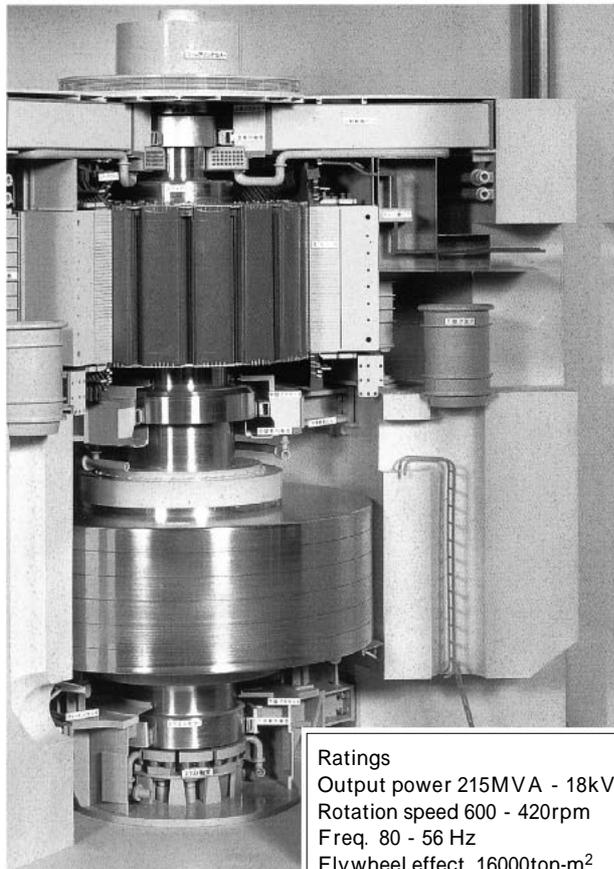
我が国において特筆すべきフライホイールの産業応用が京浜急行電鉄<sup>(株)</sup>で開発され、実用化されている。近年省エネルギーの観点からエネルギー回生の可能なチョッパー制御の回生制動車の採用が一般化している。電車の数が増え、回生が重なる時電力の余剰が生じ回生ができない場合がある(回生失効)。また、架線電圧は通常 1,500 V であるが変動幅 800 V にもなり、空調機等の運転にも支障が生じていた。ここに架線電圧維持のため、実用機として 25 kWh 交流駆動電車線電力蓄勢装置(フライホイールポスト)を開発した。フライホイールは横軸高速可変速誘導発電電動機方式でヘリウムガス中で回転している。エネルギー充放電量は 90 MJ である。誘導発電機システムにより架線電圧を維持するようにフライホイールの加速・減速を行っている。1988(昭和63)年8月より実運転に入り、架線電圧は安定化され、その効果は十分発揮されている。フライホイールの運転電力の約40%は回生電力から得られると思われる[3]。

#### (3) 短周期負荷平準化および電力系統の安定度向上用のフライホイール

近年の可変速揚水発電システムの発展はフライホイールに新しい電力系統安定化装置としての可能性を与えた。可変速システムは交流励磁の同期発電機でローターのスピー



Flywheel on Machining  
 $D = 6\text{ m}$ ,  $t = 0.4\text{ m}$ , Weight = 107 t, one disk of the six disks bolted flywheel



Model of T-MG

Ratings
Output power 215MVA - 18kV
Rotation speed 600 - 420rpm
Freq. 80 - 56 Hz
Flywheel effect 16000ton-m <sup>2</sup>
Yield Energy 4000MJ
Drive: thyristor starter 19MW

Fig. 1 8 GJ-215MVA flywheel generator for fusion experimental facility of JT-60.

ド変化に対して周波数と位相を制御して電力系統とのエネルギー充放電，調相連係が可能である．交流可変速技術に関して，日本では独自に重電各社の開発が終了し，実用機が系統で活躍している．まず関西電力(株)と日立製作所は世界初の可変速揚水発電試験システムを成発電所(22 MVA)に建設し，1987年6月から実験運転に入っている．その後，最大のものは関西電力(株)大河内発電所に395 MVAの可変速揚水発電機を設置し，運転に入っている．交流可変速機は可変速運転によるポンプ出力の調整とポンプ効率の向上，そして運転領域の拡大を周波数制御運転と併せて実現できるようにと開発された．交流励磁可変速同期発電機の技術を採用したフライホイール電力貯蔵システムは回転速度の変化にかかわらず電力系統と直接結合でき，かつ同期調相機としての動きも合わせ持つことができる．高速制御できる利点を持つフライホイール電力貯蔵システムは電力負荷平準化用あるいは電力障害補償，調相そして電圧維持さらには電力動揺抑制制御も可能な新しい電力系統制御装置として可能性が検討されている．水力発電を持たない沖縄電力に設置された ROTES はその例である．沖縄電力が実用化した周波数変動対策装置 ROTES は，23 MW の出力で1996(平成8)年から運用されており，その意義はたいへん大きい．電力系統の周波数制御は発電量と需要とのバランスで決まり，その変化時定数は数秒と早い．大きな電力系統では総需要の変化は平均化され，相対的に数%以下の大きさの電力パルスの影響は見られなくなる．電力の品質が製品の品質となると言われている鉄鋼薄板圧延のように，電力のバックパワーは産業を成立させるインフラストラクチャーである．日本のように国全体が一

系統を構成し，発電総量が1億kWを超えるような国では，かなり巨大な電力負荷プラント(JT-60のような)を建設しない限り問題としないが開発途上国(国連統計では200万kW以下がほとんど，大きくても500万kWまで)の電力系統にとって，安定度の欠如は工業化への最大のネックになっている．今後，途上国も需要が伸びる地域でこの種の電力機器が重要であることは，分散化する我が国の電力事情と対策の方向が一致している．Fig.2は可変速フライホイール付同期発電機を適用したシステム構成例と沖縄電力(株)で実用化された ROTES のイラストを示す[4]．

(4) 無停電電源(UPS)と瞬低対策フライホイール

フライホイール式UPSは，待機中のエネルギー損失が小さいことが必要で，この点が電池式に対して大いに不利である．最新の無停電電源用フライホイールは損失を低減するため真空中で回転し，磁気軸受をもつなど挑戦的なフライホイールである．現在一般に用いられる蓄電池をフライホイールに置き換えた構成であるがフライホイールの特長である短時間のバックアップに特化して小型化によって新しい利点を打ちだそうとしている．最近販売開始したフライホイール式UPSは，特長を生かして半永久的寿命で，バッテリー式よりも効率が高いとしている．これは短時間15秒のバックアップをねらって65kVAから1,200kVAフライホイール式UPSをクリーンソーステクノロジーと称し，低気圧中で冷却を兼ねて風損を減らし，磁気アシスト軸受用の磁界のリターンでフライホイールを兼ねるローターを80%浮上させ，かつ浮上吸引磁界のリターンを利用してレクタンス差による強弱を作りそれを回転界磁としている同期機タイプである[5]．

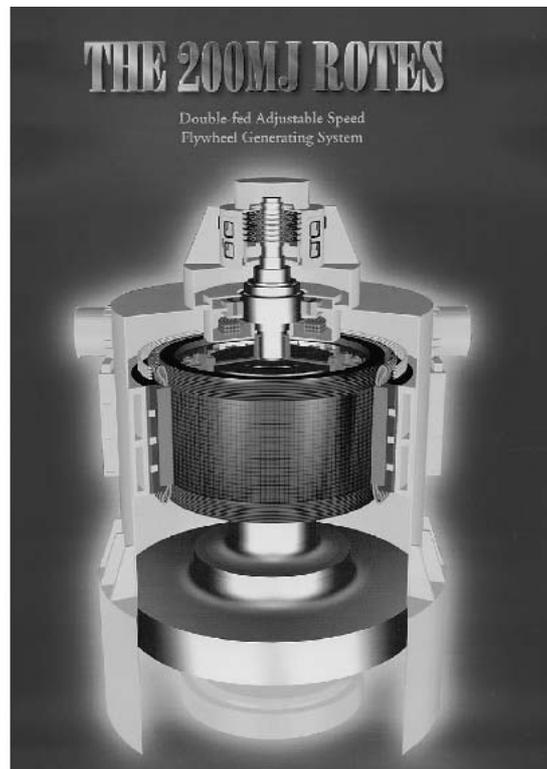
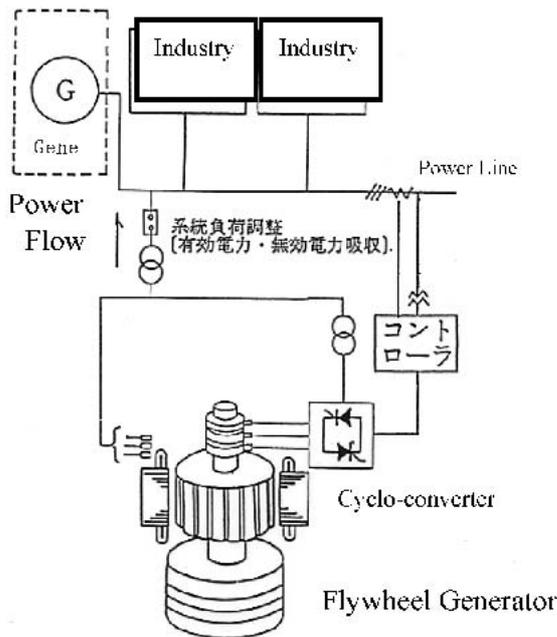


Fig. 2 The variable speed flywheel generator for Industries and local generation (IPP).

また、近年、大きな問題となっている電源の瞬時電圧低下、すなわち系統の切り換えによる0.1秒程度の電圧低下に対して、フライホイールを用いた瞬低対策装置は、短時間大きな出力が発生可能であることに期待している。Fig. 3は開発中の誘導電動機式フライホイール瞬低対策装置である。これは同期速度で空転・待機させると、停電時自動的に誘導発電機になって電圧を維持することを利用している。

### 3.3.4 フライホイールの課題

フライホイールは大容量で産業界、電力界で実際に利用されている実績がある。フライホイールと一体構造の発電機が電力変換器になっていることが特徴である。また長寿命で高エネルギー密度であることが特徴であるが、設計する場合、解決すべき課題も多く、これらをフライホイールの応用分野に応じて考慮することが必要である。

- ・高密度エネルギーを目指すフライホイールは材料が高価であるので生産技術の開発が必要。
- ・高速回転体の安全性の確保。回転バランスの調整に時間がかかる。
- ・軸受の寿命と損失低減。軸受には重量を受け持つスラスト軸受とガイド軸受がある。磁気浮上軸受にすると軸剛性の不足からアクティブ磁気軸受が必要になるが、バックアップも必要である。アクティブ磁気軸受は制御電力が必要である。
- ・高速回転になると風損が最大の損失であるが真空にすると今度は冷却ができない。電動発電機のヘリウム、水素冷却を考慮する必要がある。
- ・通常回転速度の発電機の効率は十分高いが、より高速回転を選択した場合、モータ、発電機の高効率化が必要である。周波数変換器の容量が大きくなって、2次電池シ

ステムよりも高価になってしまうので、よほど小型、長寿命化にメリットがある場合以外は検討の余地がある。  
 ・筆者らが、経産省の補助で作った鉄製フライホイールに11 kW 誘導電動機をつけたもの(10 kW - 30秒)を製作したが、小容量では、かなり(50万円程度)経済的である。  
 以上の課題のなかで変電所に設置する規模(10 MWh)のフライホイールを高温超伝導バルク材のマイスナー効果を使って超低損失で回転させる超伝導軸受のフライホイールが開発中である。フライホイール電力貯蔵の問題は軸受だけではないので実用化には課題が多い[6,7]。

### 3.3.5 圧縮空気による電力貯蔵 (Compressed Air Energy Storage : CAES)

電力エネルギーを蓄積する媒体として、無尽蔵でコストの安いものが良い。揚水発電は水の重力エネルギーを使って大規模な貯蔵を可能にしているのは良い例である。このCAESは空気の圧力エネルギーを利用している。コンプレッサーを使って空気を圧縮して圧縮空気を作り、タンクに貯蔵する。必要なときに空気圧で回るタービンで発電機を回して電気を得る。確かに圧縮空気は動力源として、多くの分野で利用されている。しかし、圧縮過程で、発生する熱が有効利用されない場合、電力貯蔵装置としての効率を著しく下げる。貯蔵形態としては、成り立たないと言ってよいが、ガスタービン・コージェネ発電システムと組み合わせると、かなり有効な使い方ができる。特に、都心で圧縮空気の貯蔵タンクに地下空洞が使える場合、有望である。

通常、ガスタービン発電機は、ガスの燃焼エネルギーの半分以上を空気の圧縮に使用して、残りが発電に回っている。したがって、圧縮空気を別に作っておき、これで燃焼発電すれば、すべてが発電になって同じ燃焼で倍以上の発

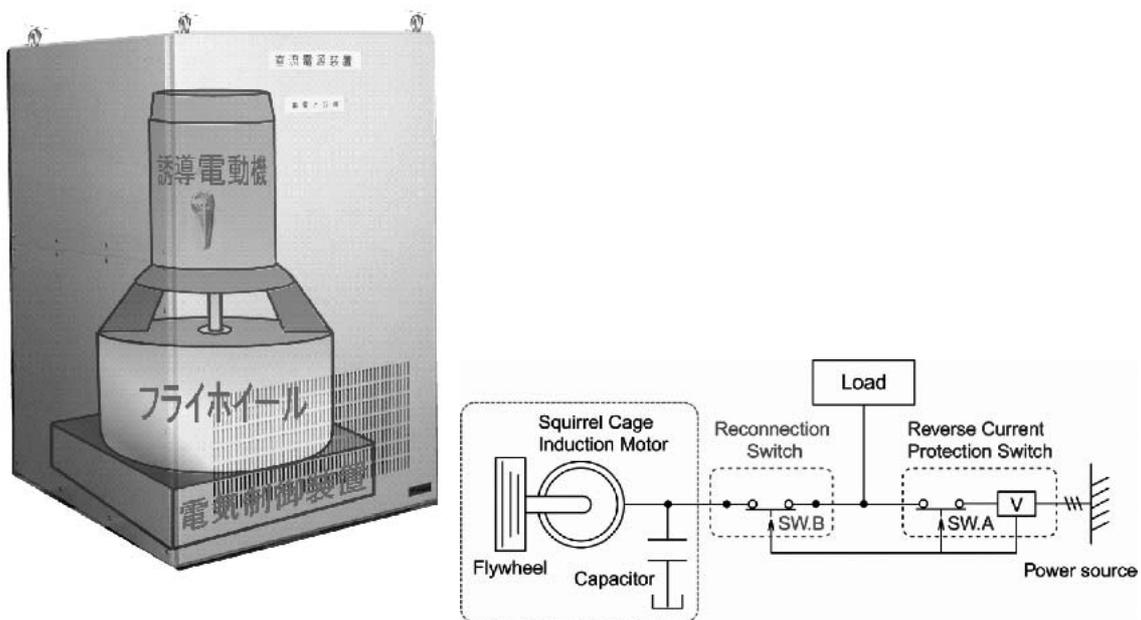


Fig. 3 Circuit of voltage sag restorer using induction motor.

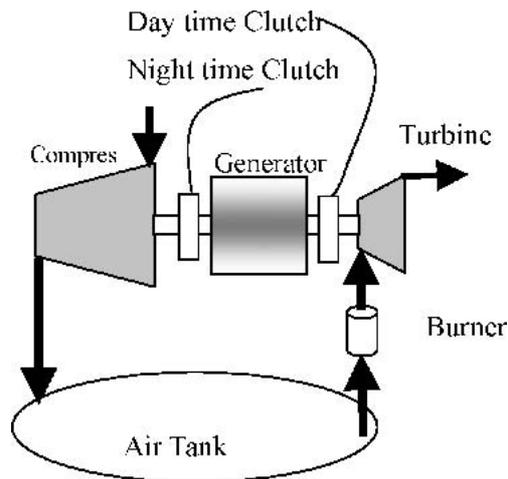


Fig. 4 Compressed air energy storage : CAES.

電出力を得ることができる。これが CAES の基本概念で電力貯蔵とは少し異なる。すなわち、電力のピークをシフトさせる、電力平準化技術に似ている。

原理図を Fig. 4 に示すがタービン出力の倍増が目的である。圧縮空気の貯蔵として、米国の例では岩塩層のなかに巨大空洞(地下500から800 m 以下、約 100 m 角の空洞)を作りそこに70気圧で蓄える。110 MW の発電所で1991年から現在も運用されている。

我が国では、大陸にあるような岩塩坑道がないので水封方式の地下貯蔵が提案されている。これは地下水が空洞からの漏気を防いでくれる効果を使ってライニングなしにタ

ンクを形成させる方式である。神岡鉱山での実験では19気圧まではほとんど漏れは見られなかった。CAES とガスタービン発電機を結合したシステムは、電力貯蔵ではないが、我が国の原子力発電100%の夜間電力有効利用として、昼の電力ピーク対応技術として、今すぐにも適用可能な技術であるところが魅力である[8,9]。

#### 参考文献

- [ 1 ] 嶋田隆一, 谷本光生, 大森憲一郎, 松川達哉:「核融合電源用フライホイール付電動発電機の短周期ロードレベリング装置への適用」平成元年電気学会全国大会 No.1505.
- [ 2 ] T. Matsukawa, M. Kanke and R. Shimada, IEEE Trans. Energy Conv. EC-2, 262 (1987).
- [ 3 ] 島津登志成, 橘 浩司:三菱電機技報 63, 8, 60(1989).
- [ 4 ] 力石浩孝, 有満 稔他:電気学会論文誌 113-D, No.11, (1993).
- [ 5 ] キャタピラーパワーシステムズ社の CATUPS, <http://www.catpower.co.jp/> を参照。米国テキサスのアクティブパワー社の <http://www.activepower.com/> を参照。
- [ 6 ] 樋笠, 横山:電気学会論文誌 B133-B, 768 (1993).
- [ 7 ] 嶋田隆一:「エネルギー技術大系」第3章第節力学エネルギーの貯蔵 3.1 フライホイール, 日本伝熱学会編(エヌティーエス, 1996), p.825.
- [ 8 ] 中川加明一郎:電気学会誌 123, No.5 (2003).
- [ 9 ] 志田原他:「神岡実験場における水封式圧縮空気貯蔵技術の実証 実験場の推理地質特性と適正」電力中央研究所研究報告総合報告 U01024 (2001).