

■ 報 文 ■

ダリウス形風力発電装置の開発・運転試験

Development and Performance Test of Darrius Type Wind Power Generator

高見 俊一*
Syunichi Takami

中原 堅司**
Kenji Nakahara

高原 弘***
Hiroshi Takahara

清水 誠****
Makoto Shimizu

武藤 浄*****
Kiyoshi Taketoh

市川 晃*****
Akira Ichikawa

関屋 慎*****
Shin Sekiya

坂井 時弘*****
Tokihiro Sakai

1. ま え が き

昭和48年に始まったオイルショックを契機として、風力エネルギー利用に関する本格的な研究開発が開始された。特に欧米では、政府機関主導の下に既存電力網に連係する大規模システムの開発が強力に進められており、既にMW級の大型風力発電装置が稼働するに至っている。一方我が国では、昭和57年にサンシャイン計画の一環として100kW機が建設され、さらにMW級の開発を目指した検討が進められているものの、今までは数十kW以下の中小規模風力発電装置の開発例が多い。

風力発電の実用化を図るうえで、装置の信頼性および経済性の向上が不可欠である。信頼性を上げるためには、自然風下での装置の性能を十分把握し、運転時に生じる種々の技術的問題点を解決する必要がある。

一方、経済性を上げるためには、合理的な設計により設備費および運転コストの低減を図る必要がある。これらを実現するには、自然風下における系統的な長期間の運転試験が必要であるが、いまだ公表された試験例はほとんど見当たらない。

筆者らは、以上の観点から昭和55年より風力発電の実用化に関する研究を実施しており、昭和56年に実証プラントとして和歌山県串本町潮岬に容量5kWのダリウス形風力発電装置を設置した。本装置における主な研究内容は、(1)自然風下における装置の性能評価、(2)

2種類の発電方式(同期発電機方式、誘導発電機方式)の比較検討、(3)設置地点の風況と年間特性の関係の把握である。

本装置により、昭和56年6月から昭和59年2月まで試験を実施し、種々の有益なデータを得た。装置の詳細については既に報告^{1)~3)}したので、本報告では装置の概要と試験結果について述べる。

2. 装置の仕様と構成

本装置の主な仕様を表1に示す。発電機は同期発電

表1 ダリウス形風力発電装置の仕様

定格出力	5kW	タービン直径	8 m
定格風速	10 m/s	タービン高さ	8 m
回転速度	50~100 ^r pm	ブレード枚数	2
運転風速	4~15 m/s	ブレード材質	アルミ合金
始動風速	4 m/s	翼形	NACA0015
耐風速	60 m/s	翼弦長	0.3m
増速比	1:15.7	制動機構	スポイラ, 電磁ブレーキ, 機械ブレーキ
発電機		始動方式	誘導電動機*
同期発電機(4極, 1,570 ^r pm)		蓄電池	110V, 150Ah
誘導発電機(6極, 1,200 ^r pm)			

* 誘導発電機と兼用

機(いわゆる交流機)と誘導発電機の両方を備え、切替えて運転できるように構成し、運転風速は設置地点の風況をもとに設定した。なお、誘導発電機は同期発電機運転時の始動電動機を兼用する。

本装置の構成を図-1に示す。装置は発電部、電源部、

* 新日本技術コンサルタント(株)海外電気部部長

〒542 大阪市南区島之内1-20-19 丸善石油ビル内

** 関西電力(株)総合技術研究所技術解析試験室主幹

*** 関西電力(株)総合技術研究所試験主任

**** 関西電力(株)総合技術研究所技術解析試験室

***** 三菱電機(株)中央研究所エネルギー研究部グループマネージャ

***** 三菱電機(株)中央研究所エネルギー研究部主幹

***** 三菱電機(株)中央研究所エネルギー研究部

***** 三菱電機(株)長崎製作所開発部主幹

(註) 本研究会第2回研究発表会(58/4/25)で講演
原稿受付日 (59/3/26)

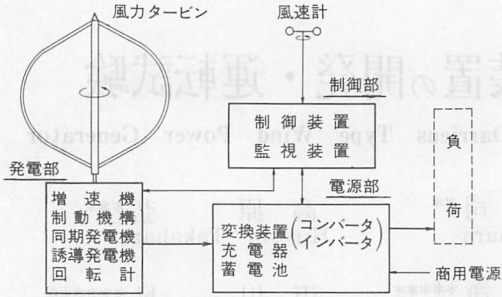


図-1 風力発電装置の構成

制御部および負荷から構成される。発電部は、風力タービン、発電機などからなり、風力エネルギーを電気エネルギーに変換する部分である。電源部は、発生した電気エネルギーを利用しやすい形に変換する部分である。制御部は、風速計、回転計などの各種検出器からの信号により発電機、制動機構などの制御・保護・監視を行う部分である。

3. 風力タービン

図-2に本装置の外観を示す。ブレード形状は、製作の容易さを考えて直線と円弧からなる近似トロポスキアン曲線⁴⁾とし、ブレード枚数は2枚とした。翼形は、空力性能とブレード剛性を考慮してNACA0015翼を採用した。

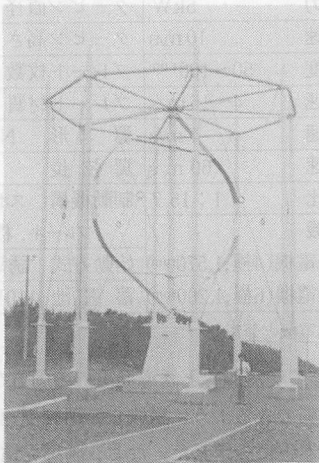


図-2 風力発電装置外観

ブレード中央部にはスポイラ⁵⁾を取付けた。これは、タービンの回転速度が設定値(100rpm)を越えると遠心力によって自動的に開き、ブレーキ作用を行うものである。タービンの耐振性および耐風性を向上させるため、ブレードにはストラットを設け、タービンの上部支持方法として8本の支柱による支持方式を採用した。

なお、過回転による損傷を防ぐために、つぎの3重の制動機構を設けて装置の信頼性を高めた。強風時には、設定回転速度でスポイラが作動し、この回転速度より若干高い回転速度で電磁ブレーキ、機械ブレーキが順次作動する。

風力タービンの性能は、ブレード枚数、翼形などに依存する。図-3に多流管理論⁶⁾に基づくダリウス形風力タービンの性能曲線の計算結果を示す。縦軸の出力係数はタービン効率に相当し、横軸の周速比はタービン最大径部のブレード周速と風速の比を表す。出力係数はソリディティが約0.3のときに最大となるが、本装置ではタービンの運転、制御の容易さを考えて、広範な周速比域で高効率になるようにソリディティを0.15とした。なお、発電機容量、ブレーキ容量、同期発電機の出力制御目標値など、装置の設計、運転に関わる諸量はこの性能曲線をもとに決定した。

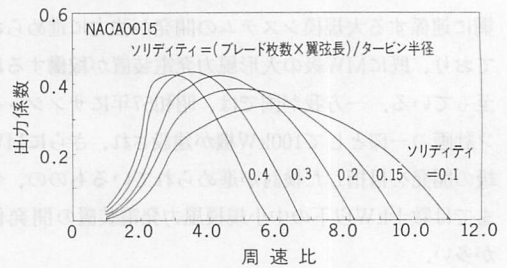


図-3 ダリウス形風力タービンの性能曲線（計算値）

4. 発電・運転方式

4.1 発電方式

タービンへの入力エネルギーは、風速の変化に伴って広範囲に変化する。また、タービンの出力係数は回転速度と風速との関係で異なる。したがって風力エネルギーを有効に利用するためには、設置地点の風況、タービンの性能、負荷の特性などを考慮して、これらの状況に適合するような発電方式、運転方式を選定する必要がある。

本装置では、同期発電機方式（系統並入運転および単独運転）と誘導発電機方式（系統並入運転）を切替えて運転できるように構成しており、各方式の比較試験を実施することができる。

本装置の概略系統図を図-4に示す。同期発電機方式の場合は、系統並入運転（DCリンク方式）と単独運転を切替えて運転できるようにしている。本方式では、同期発電機出力を変換装置（コンバータ、インバータ）

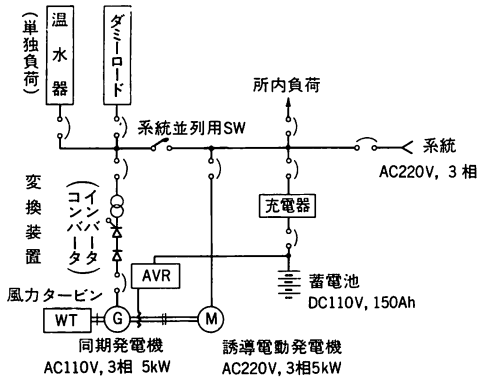


図-4 概略系統図

を介して送電する。なお単独運転の場合、負荷は温水器である。本方式では、風力エネルギーを有効に利用するためタービン回転速度を可変とし、各風速において装置を最高効率点で運転するように出力制御を行う。誘導発電機方式は、誘導発電機出力を系統へ直接送電する方式（ACリンク方式）であり、タービンはほぼ一定速度（75rpm）で運転される。したがって、最高効率点で常に運転することはできないが、変換装置が不要となる利点がある。

本装置は、通常は同期発電機による単独運転が実施され、系統並入運転は随時実施される。

4.2 運転方式

同期発電機方式の場合、風速が 4 m/s を越えると誘導電動機によりタービンを始動させる。タービン回転速度が設定値（50rpm）を越えると、誘導電動機の入力を停止し風速に応じた負荷を負担するよう出力制御を行う。風速が10m/s以上の場合には、発電機容量の関係から定出力制御（5kW一定）を行う。

前項で述べたように、本方式では最高効率点付近で装置を運転するよう出力制御を行うため、タービンはほぼ周速比一定で運転される。したがって、発電機出力は風速の3乗にほぼ比例するが、本装置では制御上の容易さを考えて、3次曲線を折線で近似した出力制御を行った。出力制御目標値は、タービンの理論性能、機械伝達効率、発電機効率などを考慮して設定した。なお、タービンの応答性、発生電力の利用面などから、出力の制御には1分間平均風速を用いた。

一方、タービン回転速度の制御はつぎのように行う。タービン回転速度が100rpmに達するとスポイラが作動するが、更に強風になりタービン回転速度が110rpmを越える場合には、電磁ブレーキが作動する。通常は、電磁ブレーキが作動してもタービン回転速度が設定値

以下になれば、電磁ブレーキは開放される。一方、風速が15m/s(最高運転風速)以上の場合には、電磁ブレーキはタービンが停止するまで作動し、一定時間経過後に開放される。

誘導発電機方式の場合は、風速が 4 m/s を越えるとタービンは始動し、約75rpmで運転状態になる。運転状態では、風速の増減に応じて回転速度はわずかに増減し、それと同時に出力が自動的に増減する。なお、タービンの運転速度を約75rpmに設定したのは、年間の発電電力量（タービンの理論性能と風況から推定）を最大にするためである。

5. 発電性能試験結果

5.1 同期発電機方式

図-5に風速、タービン回転速度および発電機出力の時間変動の一例を示す。風速は1分間平均風速である。図より、発電機出力およびタービン回転速度は風速にほぼ追従して変化しており、制御が良好に行われていることがわかる。

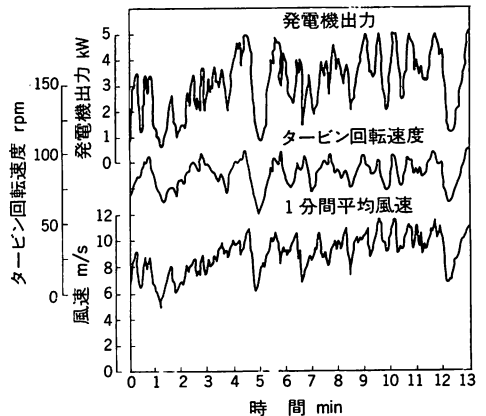


図-5 運転特性（同期発電機方式）

図-6に発電機出力およびタービン回転速度と風速の関係を示す。実線は出力制御目標値を表す。実測値は目標値よりも若干低く現れているが、出力制御は全風速域にわたってほぼ良好に行われている。タービン回転速度は風速にほぼ比例して増加しており、定格風速（10m/s）時にほぼ100rpmに達している。タービン回転速度がほぼ100rpm以下に抑えられているが、これはスポイラが正常に作動したためである。

図-7に発電効率と周速比の関係を示す。発電効率は、風力エネルギーのタービン入力（1分間平均）に対する発電機出力（1分間平均）の割合を表す。図中、黒丸は風速10m/s以上におけるデータであり、この領域では定

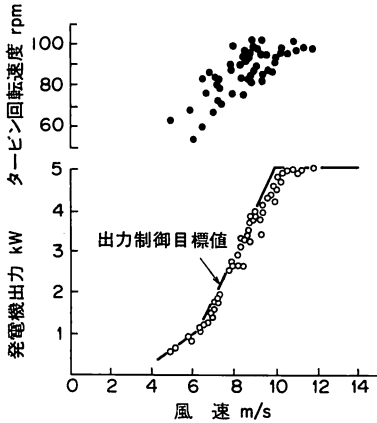


図-6 発電機出力およびタービン回転速度と風速の関係（同期発電機方式）

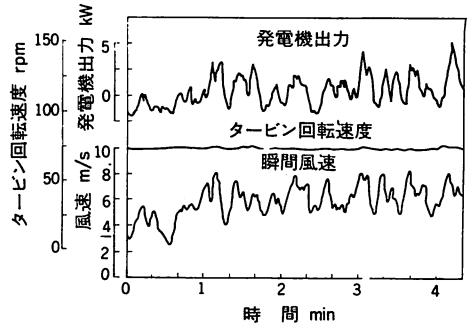


図-8 運転特性（誘導発電機方式）

出力制御およびスポイラによる過回転制御が行われるため、周速比が低く発電効率は低下する。図から、発電効率は周速比4～5のとき最大(約22%)となっており、風速10m/s以上の領域を除けば、データはこの周速比を中心に現れている。したがって、装置はほぼ最高効率点付近で運転されていると言える。なお、この図には運転風速域(4m/s～15m/s)におけるデータを示しており、この風速域以外では発電効率は零となる。

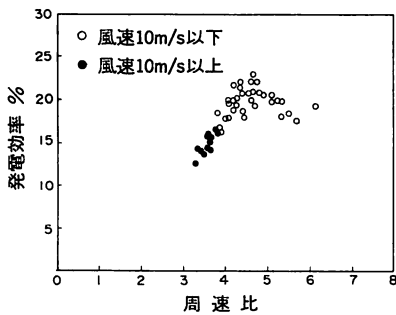


図-7 発電効率と周速比の関係（同期発電機方式）

に設定する方が適切であることがわかった。一方、風速が12m/s以上では逆に出力が減少するが、これは翼が失速し、タービンの出力係数が低下するためである。

図-10に発電効率と周速比の関係を示す。タービンはほぼ一定速度で運転されるため、風速の変化に応じて周速比が変化する。周速比が約6以下(風速5m/s以上)で発電運転となり、4付近(風速約8 m/s)で発電効率は最大となる。周速比4における発電効率は、平均で約30%である。なお図からわかるように、周速比が高くなるにつれてデータのばらつきは大きくなる。これは、図-9の各風速における発電機出力のばらつきが同程度であるので、発電効率に換算すると、入力エネルギーの小さい低風速域(高周速比域に対応)になるほど発電効率のばらつきが拡大されるためである。

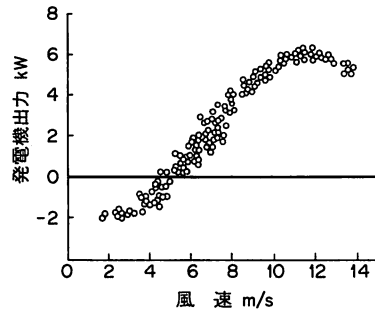


図-9 発電機出力と風速の関係(誘導発電機方式)

5.2 誘導発電機方式

図-8に風速、タービン回転速度および発電機出力の時間変動の一例を示す。風速は瞬間風速を表す。発電機出力は風速に対して良好な追従性を示しており、タービン回転速度は75rpm付近でわずかに増減していることがわかる。

図-9に発電機出力と風速の関係を示す。風速が約5 m/s以上で発電し、12m/s付近で発電機出力は最大(約6kW)となる。風速が5 m/s以下では系統より受電され、4m/sでは約1 kWの電力が必要である。この結果、本装置の場合、誘導発電機方式における始動風速は5m/s

5.3 考察

同期発電機方式と誘導発電機方式における発電性能を比較すると、つぎのことがわかる。

- (a) 最大発電効率は、誘導発電機方式の方が高い。
- (b) 発電機出力は、8m/s前後の比較的広い風速域で誘導発電機方式の方が高い。
- (a)の理由は、つぎのように説明できる。5.1項で述べたように、発電効率 η は風力エネルギーのタービン入

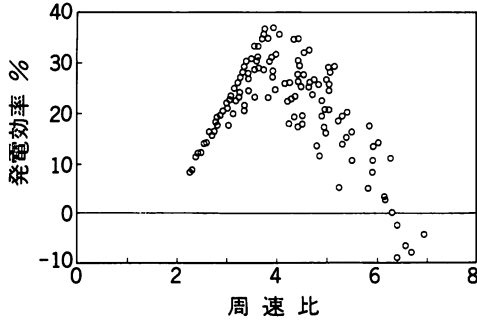


図-10 発電効率と周速比の関係(誘導発電機方式)

力の1分間平均Pに対する発電機出力の1分間平均Wの比として定義される。Pは次式で与えられる。

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho A \int_0^{t_0} V^3 dt \right) / t_0 \quad (1)$$

但し、 ρ ; 空気の密度, A; 受風面積, V; 瞬間風速, t; 時間, t_0 ; 1分である。一方、図-5, 図-8からわかるように、発電機出力は誘導発電機方式では瞬間風速に、同期発電機方式では1分間平均風速にほぼ追従して変化する。したがって、各方式におけるWは近似的にそれぞれ次式で与えられる。

$$W_s = \left(\frac{1}{2} \rho A \int_0^{t_0} \eta_s \cdot \bar{V}^3 dt \right) / t_0 \quad (2)$$

$$W_i = \left(\frac{1}{2} \rho A \int_0^{t_0} \eta_i \cdot \bar{V}^3 dt \right) / t_0 \quad (3)$$

但し、 η ; タービン, 増速機, 発電機などの機器全体の効率, \bar{V} ; 1分間平均風速である。また添字は, s; 同期発電機方式, i; 誘導発電機方式である。

ここで、最高効率点付近での発電効率を考える。実測結果によれば、最高効率点付近では η は両方式ともほぼ等しくなるため、 $\eta = \eta_s = \eta_i$ とおく。また、0~ t_0 間における η の代表値を $\bar{\eta}$ とすると、各方式における最高効率点付近での発電効率は、式(1)と式(2), 式(3)よりそれぞれつぎのように表される。

$$\zeta_s = W_s / P = \bar{\eta} \cdot \int_0^{t_0} \bar{V}^3 dt / \int_0^{t_0} V^3 dt \quad (4)$$

$$\zeta_i = W_i / P = \bar{\eta} \quad (5)$$

ここで、風速Vがつぎのように周期的に変動する場合を考える。

$$V = \bar{V} + \Delta V \sin(2\pi t / T) \quad (6)$$

但し、Tは風速変動の周期である。式(6)を式(4)に代入して計算すると、 $\zeta_i > \zeta_s$ となる。したがって、最大発電効率は常に誘導発電機方式の方が高くなる。

一方、(b)は発電効率の点から考えるとつぎのようになる。同期発電機方式では、定出力制御を行う高風速域を除けば、ほぼ最高効率点付近で運転される。これに対して誘導発電機方式では、最高効率を得られる風速付近では発電効率は高いが、この風速から離れるにしたがって発電効率は低下する。しかし、(a)のようになっているため、発電効率は上記風速を中心とするある風速域で誘導発電機方式の方が高くなる。

6. 長期運転試験結果

本装置により、昭和56年6月から昭和59年2月までの約2年半、定期検査などの停止期間を除いてほぼ連続的に運転試験を行った。ここでは、昭和56年8月から昭和58年7月までの2年間の運転試験結果について述べる。なお、上記期間中に系統並入運転も実施したが、ここでは単独運転時のデータのみを検討の対象とする。

図-11に、設置地点における月別の平均風速と平均発電電力(発電電力量/試験時間)を示す。年平均風速は、初年度(56年8月~57年7月)が3.6m/s、次年度(57年8月~58年7月)が3.7m/sであり、次年度の方が若干高い。いずれの年度とも夏期に風が弱く冬期に風が強いという結果が出ており、これに伴って平均発電電力も夏期に少なく冬期に多くなっている。

平均発電電力と平均風速の関係を調べると、平均発電電力は平均風速の変化にほぼ対応して増減しているが、例えば56年8月と57年8月のように平均風速が等しくても、平均発電電力に大きな差が生じる場合がある。この場合は、57年8月に台風の影響があり、この期間中にかなり多くの発電電力量を記録したためであるが、このように平均風速が等しくても風況が異なれば、平均発電電力は異なる。したがって、発電電力量、平均

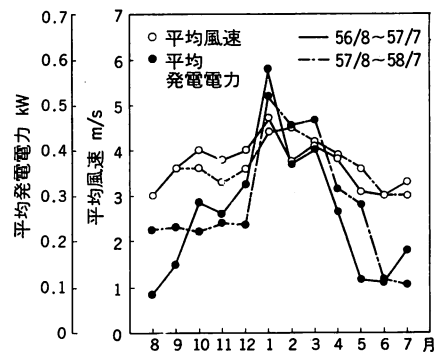


図-11 月別の平均風速と平均発電電力

表2 長期運転試験結果

項目	期間	初年度(56/8~57/7)			次年度(57/8~58/7)		
		夏期	冬期	年間	夏期	冬期	年間
試験時間	h	1,800	2,124	8,220	1,860	1,536	6,924
平均風速	m/s	3.1	4.1	3.6	3.0	4.2	3.7
平均発電電力	W	130	440	270	150	390	280
稼働率	%	28	44	37	23	47	35
エネルギー変換効率%		5.9	9.2	7.3	6.3	9.7	8.5

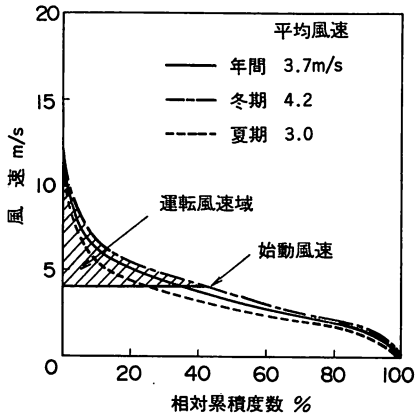


図-12 設置地点の風況曲線
(昭和57年8月~昭和58年7月)

発電電力などを精度よく予測するためには、風況のデータが不可欠である。

図-12に次年度における夏期(57年8月, 58年6月, 7月), 冬期(57年12月~58年2月)および年間の風況曲線を示す。斜線域は運転風速域を表す。ここで始動風速における相対累積度数は、いわゆる装置の稼働率(運転時間/試験時間)に相当する。なお、運転時間はタービンが作動した時間を表す。図より本装置の稼働率を読みとると、夏期, 冬期, 年間でそれぞれ25%, 43%, 35%である。全風力エネルギー密度(賦存量)に対する運転風速域(4 m/s~15 m/s)の風力エネルギー密度の割合をこの図から算出すると、夏期, 冬期, 年間でそれぞれ79%, 91%, 86%となる。なお、全風力エネルギー密度に対する風速15 m/s以上の風力エネルギー密度の割合は年間1.4%程度と小さく、最高運転風速の設定は妥当である。

表2に長期運転試験結果を示す。ここで、エネルギー変換効率は試験期間中の全風速域(0 m/s~)におけるタービンへの入力エネルギーに対する発電電力量の割合を表しており、これは1分間毎に求められた発電効率を長期間にわたって平均した値に等しい。したがって、エネルギー変換効率は運転風速域以外(発電効率

は零)も含むため、運転風速域における発電効率よりも常に低くなる。ちなみに、図-7に白丸で示した風速4~10 m/sにおける発電効率は約20%であるのに対し、表2の次年度における年間エネルギー変換効率は8.5%と大幅に低くなる。

試験時間は初年度が8,220時間、次年度が6,924時間と次年度の方が少ないが、これは次年度に系統並列運転を重点的に実施したためである。

夏期と冬期のデータを次年度について比較すると、平均発電電力は夏期150 Wに対し、冬期は390 Wと多い。また、エネルギー変換効率も夏期6.3%に対し、冬期は9.7%と高くなっている。初年度と次年度のデータを比較すると、平均風速の若干高い次年度の方が平均発電電力、エネルギー変換効率が高くなっている。

稼働率の実績値を図-12の風況曲線から推定した値と比較すると、夏期, 冬期, 年間ともほぼ一致しており、設置地点の風況曲線から装置の稼働率をほぼ予測できることが確認された。

7. むすび

本報告では、和歌山県串本町潮岬に設置し、長期運転試験を実施した容量5 kWのダリウス形風力発電装置の概要と試験結果について述べた。本装置は約2年半運転され、59年2月に試験を完了した。今回得られた主な結論は、つぎのとおりである。

- (1) 同期発電機方式においては、出力制御はほぼ良好に行われ、定出力制御を行う高風速域を除けば、ほぼ最高効率点付近で運転することができる。また強風時には、スポイラによりタービン回転速度を設定値(100rpm)以下にほぼ抑えることができる。
- (2) 誘導発電機方式においては、出力は瞬間風速に対して良好な追従性を示す。風速5 m/s以上で発電し、約8 m/sで発電効率は最大となる。
- (3) 両発電方式を比較すると、誘導発電機方式の方が最大効率高く(誘導発電機方式: 30%, 同期発電機方式: 22%), 発電機出力も8 m/s前後の比較的広い

風速域で高い。

- (4) 同期発電機方式における年間特性として、稼働率 35~37%, 平均発電電力 270~280 W, エネルギー変換効率 7~9% が実績として得られた。

今後さらに得られたデータをもとに、装置の詳細な発電性能の評価, 2 種類の発電方式における年間特性の比較, 風況から装置の年間特性を予測する手法の確立などを実施し, 信頼性および経済性の高い装置の設計, 運転方法の検討に役立てたいと考える。

参 考 文 献

- 1) 高月他; 三菱電機技報, 55 巻, 7 号(1981-7), 471
- 2) 高見他; 電気四学会連合大会論文集(1982-11), 1-73
- 3) 市川他; 日本機械学会講演論文集, No. 810-9(1981-8), 33
- 4) Reis G.E. et al; Sandia Laboratories, Sand 74-0100 (1975-3)
- 5) Templin R.J. et al.; International Symposium on Wind Energy Systems(1976-9), C1-1
- 6) Strickland J.H.; Sandia Laboratories, Sand 75-0431 (1975-10)

話の泉

マイクロへの挑戦

最近の技術革新は将に目をみはるものがあり, その表現の一つとして「軽薄短小」という文字が多く見られる。古い時代の頭では何だか空虚感が感じられるのは私一人ではないだろう。ここに時代と技術の変遷が窺われる。この中の最後の小について幾つかの情報を集め検討してみたい。

小については特に超微粒子を取上げたいが, 超の定義も明瞭ではなく, ここではミクロン (μ) 以下さらにオングストローム (\AA) オーダのものを対象としたい。

物質を超微細化するには固体状態からの機械的粉碎では限界があるので, 大部分液体或は気体を經由して超微粒子化される。

水溶液からの場合は状態或はコロイド状となったものを分離するが, 一般の河浦法では河材の目詰まりのため使えないので, 揮発性の溶媒と置換し溶媒を蒸発するなどの特殊な分離法が必要となる。

気体からの生成はその大きさにもよるが一般に煙となり, 低温度の器壁に付着(熱沈着)したものを採取することは容易になされる。

水にも溶けない, 気体にもなり難い物質はアーク或はプラズマの高温下で気化したものを急冷する方法が新しく開発され, 分子の大きさに近い状態で採集される。

超微粒子は一般に非常に高ばり, 普通見掛の容積の 10~100 倍にもなる。これを或程度圧縮成形し焼結すれば 90% 以上の空隙率をもった \AA オーダの空隙をもったスポンジ状の焼結体 (Green

Pack) が得られ, 触媒或は触媒の担体として使用され, また気体の選択性河材として使用される。

超微粒子は色の径が小さくなる程その表面積は反比例として増大する。一般に表面にある分子或は原子はその内部にあるものよりも活性の程度が大きく, 粒径の小さくなる程表面に存在する割合が多くなり, 全体としてそれだけ活性化す。この傾向は粒径が 100\AA 位から急激に増加しガスの吸着或は反応により空气中で発火或は燃焼するものもある。

水素吸蔵合金は微粒子の表面に水素を吸蔵するものとすれば, その吸蔵能は全表面積に比例することになり, 粒径の微細化に応じ急激に増大する。一般に吸脱蔵の繰返しにより合金の崩壊が現われるが, 超微粒子の焼結体の表面に銅メッキすることによってこの崩壊が防止できるらしい。

物質の融点はそれぞれ個有の値をもっているが, 粒径の小さくなる程本来の融点より低下する特異な傾向がみられる。例えば粒径 100\AA では Fe... 33°C , Au... 27°C (20\AA では 737°C), Al... 18°C の低下がみられるが, これは表面積の増加のための活性化のもたらす結果だといわれている。

以前から実施されている粉末冶金の場合, 本来の融点より遥かに低い温度で焼結し(粒界の部分的融着)していることと関連あるらしく, 極端な例として銀の超微粒子は室温においてさえ焼結が進行する。超微粒子化は特に融点の高い物質(超耐熱材料)の焼結に効果的に利用されるだろう。

(F)