

長時間運転用 MHD 発電機の開発

Development of Long Duration MHD Generator

笠原 達雄*
Tatsuo Kasahara

石橋 英一**
Eiichi Ishibashi

佐々木 勇太郎***
Yûtarô Sasaki

加沢 義彰*
Yoshiaki Kazawa

政井 忠久***
Tadahisa Masai

小島 晨敬*
Akihiro Ojima

要 旨

通商産業省工業技術院大形プロジェクトの昭和41年度委託研究「長時間運転用 MHD 発電機の試作研究」に基づいて、熱入力約 3,600 kW, 最大電気出力約 2 kW, 連続運転時間(目標) 100 時間の装置の試作を行なった。本装置は昭和 42 年 10 月の運転研究において目標を上回る 110 時間の連続運転に成功した。

発電ダクトはファラデー形でその構造は本試作研究で開発したものである。絶縁壁は水冷金属空気膜冷却方式で、従来耐久性の高いとされていた水冷分割金属片構造(ペグウォール)との比較試験を行なった。電極には水冷金属電極を使用し、銅とステンレス鋼の組合せにより表面温度の分布を限定する構造とした。

1. 緒 言

熱エネルギーを機械エネルギーの過程を経ることなく、直接電気エネルギーに変換する直接発電の研究が効率の高い発電方式として世界的に取り上げられて 10 年以上経過した。直接発電には熱電気発電、熱電子発電、燃料電池があるが、なかでも MHD 発電は大容量の発電方式に適するものとして各国で研究されている。

MHD 発電の開発には、耐熱材料、高負荷燃焼器、発電ダクト、熱交換器、シード回収設備、超電導電磁石など多くの開発すべき問題がありそれぞれ研究が進められているが、特にその実現性を左右するのは高温高速の作動流体に耐えて長時間にわたり安定した運転の可能な発電ダクトの開発である。世界における MHD 発電の開発研究は高出力短時間運転と低出力長時間運転の二つの方向で進められており、近く発電出力数万 kW のプロトタイプ実験プラントの出現が期待されている。そのうち高出力短時間の方向の研究の代表的な例としてはアメリカ AVCO 社の装置 MARKV⁽¹⁾ が紹介されているが、長時間運転の方向の研究は具体的なものは無かったと言ってよい。このことは MHD 発電機の運転時間の延長に関する困難さの一端を示すものである。

MHD 発電の開発に関する通商産業省工業技術院昭和41年度大形プロジェクト「長時間運転用 MHD 発電機の試作研究」において、熱入力約 3,600 kW, 最大電気出力約 2 kW, 運転時間(目標) 100 時間の発電機の開発が委託研究として計画され、日立製作所はこれを受託した。

この研究において水冷金属壁空気膜冷却を採用した耐久性の高い発電ダクトを開発し目標を上回る長時間の運転に成功した⁽²⁾。

以下この概要について述べる。

2. 試験研究上の問題点

(1) 絶 縁 壁

一般に耐熱材料としてはセラミックが最も適しているのが、小形の発電ダクトでは全セラミック構造が採られることがあるが、MHD 発電機のように 2,000°K 以上の高温で毎秒数百 m の高速の作動ガスの侵食に耐え、強度、絶縁抵抗、耐熱衝撃性の低下が無く、かつガス中に含まれるアルカリ金属、硫黄、バナジウム、灰分による腐食に長時間耐える材料は無いと言えるので、冷却構造

との組合せが研究されている。

このうち冷却損をなるべく小さくするとともに絶縁材料の耐久性も重視した構造がセミホット形と称されているもので、アルミナ、マグネシア、ジルコニアなどの焼結品またはセメントに水冷を施したもので、水冷の金属面が直接作動ガスにさらされていない構造である。この方式は熱損失が小さく、プラント熱効率およびシードの壁面附着予防の点からは望ましいとされているが、セラミックの局部的なき裂・脱落などの問題の完全な解決はむずかしいと見られている。

このため一般に長時間機としては冷却を施した金属材料が直接作動ガスの通路の一部または相当の部分形成するコールド形が採用され、その代表的な構造がアメリカ AVCO 社の発表した水冷分割金属片構造(ペグウォール)である⁽³⁾。この構造は金属片の小ブロックの水冷したものを多数組合せ相互間をアルミナなどのセラミックで絶縁するものでありペグウォール形とも称されている。この構造は冷却された金属が作動流体に触れるので熱損失は大きくなるが、プラントがじゅうぶん大きくなりダクトの体積が壁面近傍に形成される境界層の体積に比べて大きくなれば問題ないとされている。

事実水冷分割金属片構造(ペグウォール)は最も信頼性の高いものとして実用機に適用されることを期待され、前に述べたアメリカ AVCO 社の MARKV にも使用されているが、このとき冷却水の漏えい対策がむずかしかったことが同時に報告されている。

(2) 電 極

MHD 発電用の電極は熱的な見地からは、絶縁壁と同じであるが燃焼ガスとの間および電極自身における通電現象が加わるので問題はさらに複雑である。電極も壁と同じようにセミホット形とコールド形とがあり、前者はセラミック後者は金属が主体となる。いずれが有利かは数年来議論されているがセラミック電極は材質そのものの開発が急がれている。水冷金属は熱的には耐久性の高い構造が得やすいが、表面温度が低過ぎると電導度の低い境界層が形成され、この境界層内に高い電位降下を生ずる⁽⁴⁾。またアークスポットの形成による電極の消耗の問題が出る。表面温度が高い場合は当然のことながら腐食損耗が著るしくなる。われわれの測定例では K₂SO₄ のふん囲気中では 900°C では腐食減量は、数百 mg/dm² day であるが 1,000°C ではその 10 倍以上となる。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所 工学博士

*** 日立製作所日立研究所

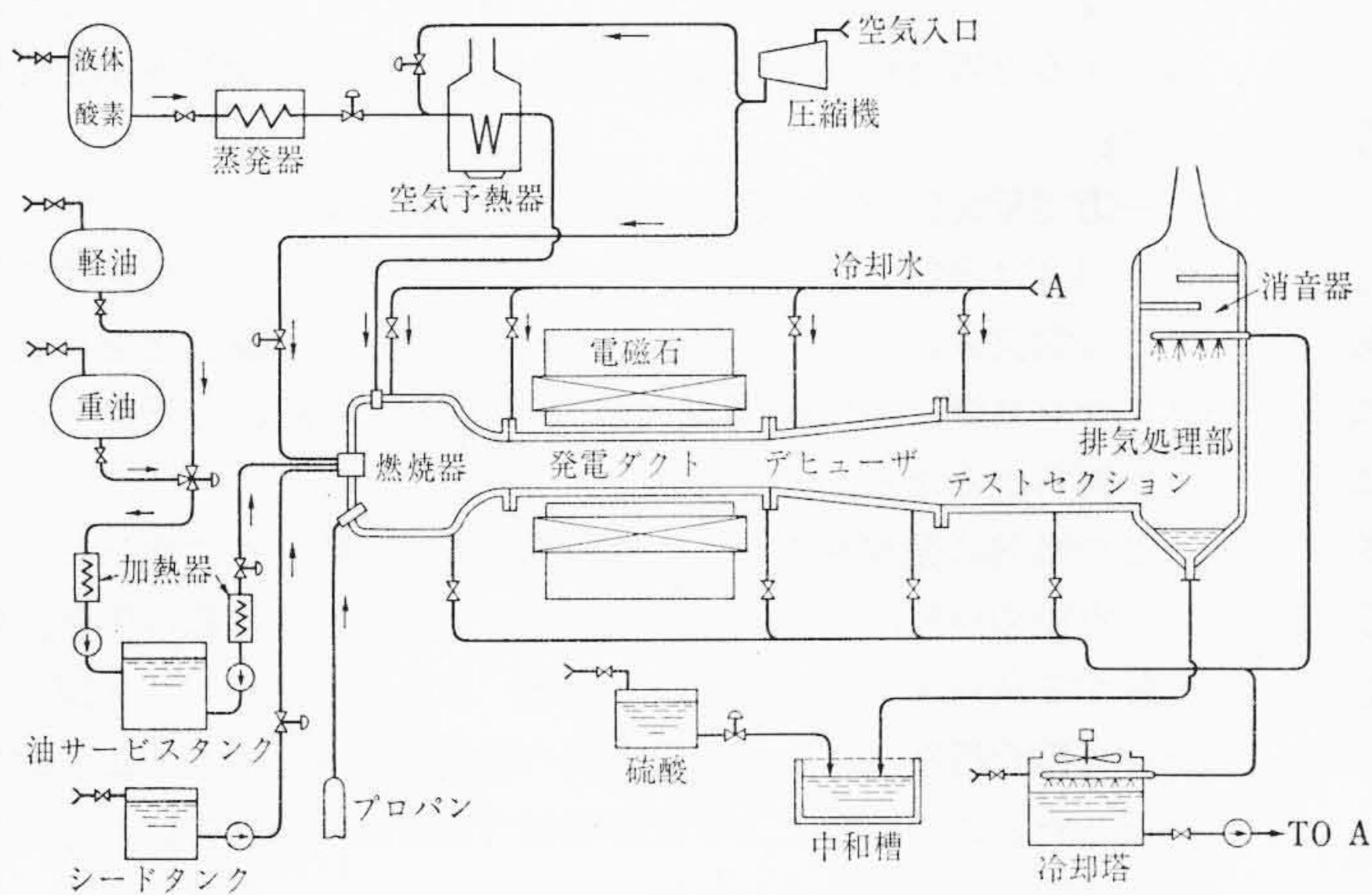


図1 装置系統図

表1 装置仕様

燃料	軽油 (重油)
酸化剤	酸素富化空気
ガス流量	約 0.5 kg/s
燃焼温度	約 2,800°K
発電部入口におけるガス温度	約 2,600°K
熱入力	約 3,600 kW
ガス流速	約 800 m/s
最大電気出力	約 2 kW
運転時間 (目標)	100 時間 (軽油)

3. 試験研究装置

(1) 大 要

図1は装置の系統図を、図2は装置の主要部を示したものである。装置の仕様は表1に示すとおりである。

燃料の軽油と重油・酸化剤の液体酸素およびシードの KOH 水溶液は別々にたくわえられる。これらはいずれも運転中に運転状態を変えることなく充てんすることが可能である。液体酸素は蒸発器で気化後圧縮機からの空気と混合され、空気予熱器で 500°C まで予熱することが可能である。重油は粘度を下げるため 100°C 程度に予熱される。シードは KOH の 48% 水溶液が使用され、ナトリウム D 線の反転法による温度測定のため、少量の NaOH が加えられる。

(2) 燃 焼 器

燃焼器の熱入力約 3,600 kW であって、水冷のステンレス鋼により構成されている。酸化剤としては酸素富化空気を使用する。燃料およびシードはいずれも主バーナで微粒化用空気とともに燃焼室に噴射されて微粒化する。起動は最初プロパン空気燃焼のパイロットバーナにスパークプラグで点火し、次いで主バーナに着火する。燃焼器には焰検出器を備えており燃焼状態の異常を検出する。

代表的な運転条件をあげると燃料 70 g/s、酸化剤の酸素富化率 60% に対して、熱入力 3,000 kW、重量流量 435 g/s となり発電機の入口におけるガス温度 2,500°C を得た。このときのシード添化率はカリウム 0.7 重量%である。

(3) 発 電 ダ ク ト

試験研究に供した代表的な発電ダクトは図3に示すとおりである。寸法は全長 900 mm、断面 30 mm×120 mm (高さ×幅) で有効長は 600 mm である。入口と出口には水冷管と石英ガラスを備え、静圧および温度の測定が可能である。

電極は試験研究の期間を通じて水冷金属電極を計画上の基本的な形として採用されたが、一部の試験では部分的に CaO で安定

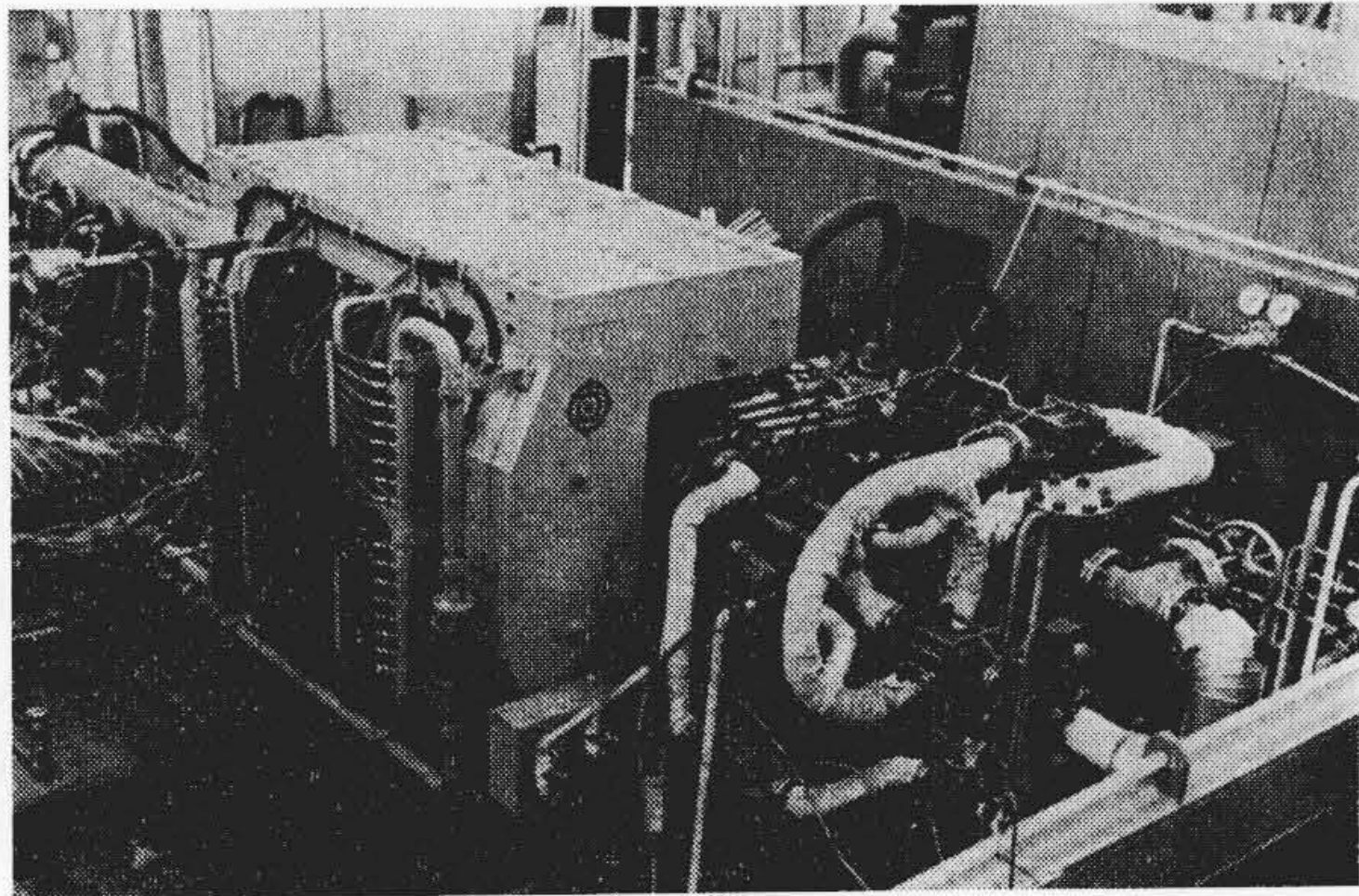


図2 装置主要部

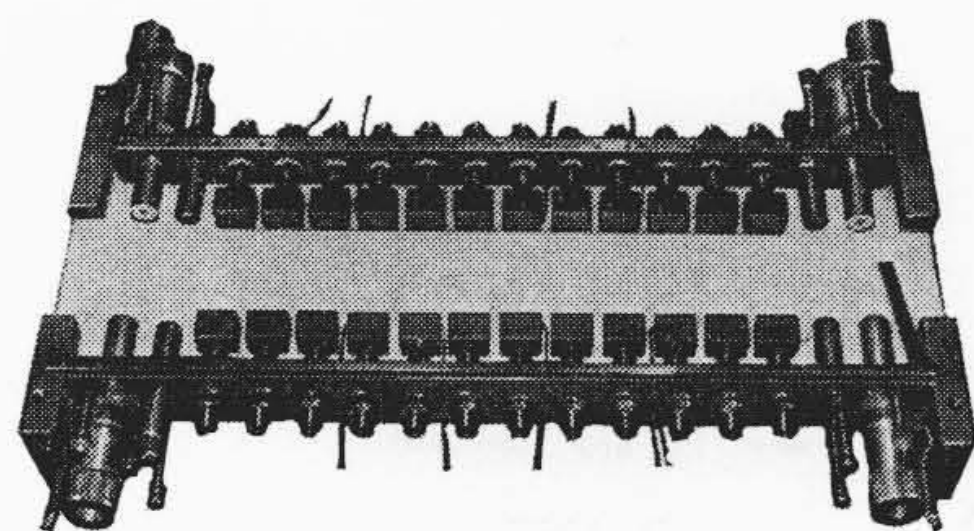
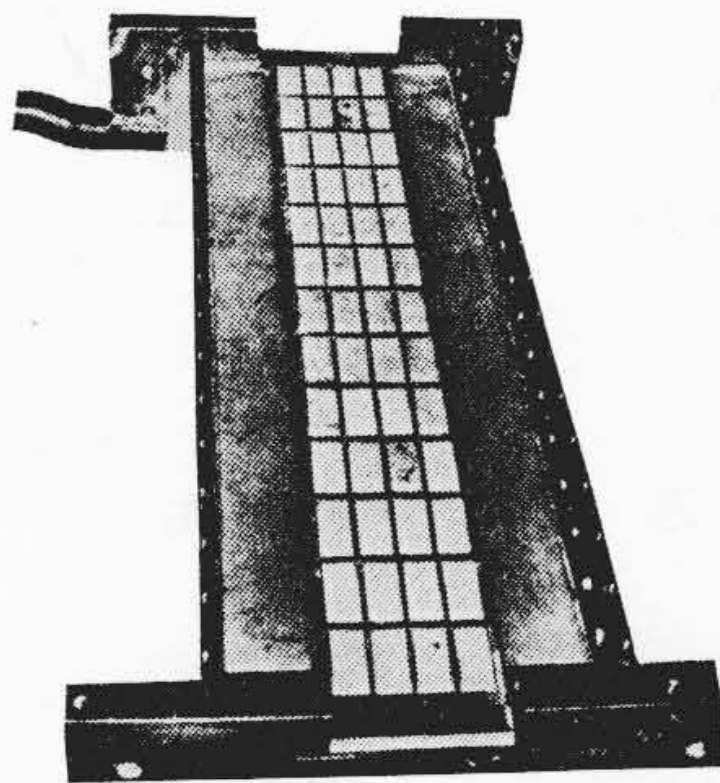
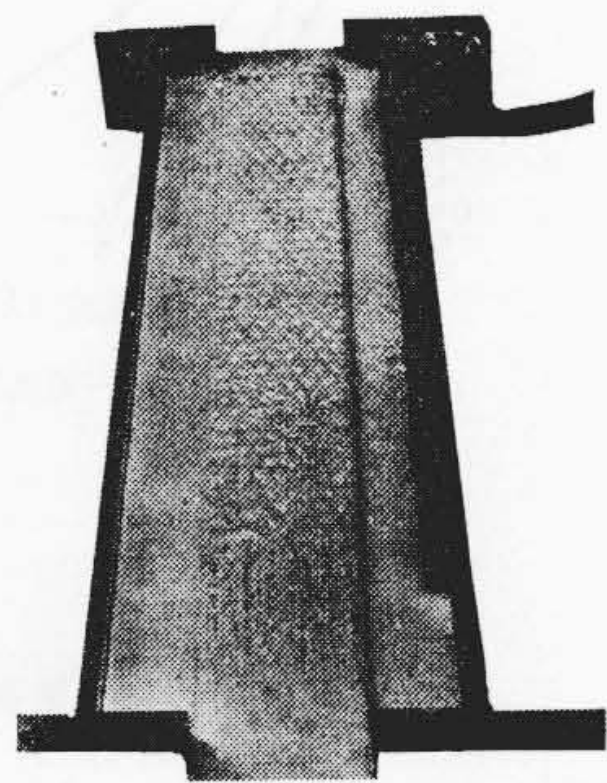


図3 発電ダクト



(a) 水冷分割金属片形



(b) 空気膜冷却形

図4 絶 縁 壁

化した ZrO_2 と ZrB_2 の複合セラミック電極が使用された。

絶縁壁は大別して二種類の形式が使用された。これらを示したのが図4である。いずれもコールドウォール形であり、図4(a)は水冷分割金属片構造 (ペグウォール) で、図4(b)は空気膜冷却形である。いずれも作動ガスに面する金属部にはアルミナ溶射を施してある。

(4) 電 磁 石

発電部の磁界を発生する電磁石は銅鉄電磁石で、磁極の幅は 160 mm、長さ 700 mm、空げき 130 mm である。磁束密度は連続 1.9 Tesla である。

(5) 排 気 処 理 部

装置の下流部に排気を冷却しシードを除いた状態で放出するための排気処理部が設けられている。シード除去に使用された水は 20% の硫酸を用いた自動中和装置により中和され放出される。また排気は最後にサイレンサを通して大気中に放出される。

(6) 運 転 制 御 装 置

運転中は中央制御盤の操作で運転条件を制御する方式を採り、燃料系をはじめ各系統の故障あるいは停電・断水などの非常の際は警報を発し自動的に安全に運転を停止するようインターロックされている。また運転中の発電機の電圧、電流、重量流量、必要な諸点の温度などのデータは自動記録できるものとしてある。なお出力特性の計測に際しては、発電ダクト電極の接続をファラデー形、連続電極形、ホール形に盤面の操作で切換ができる。

4. 試験研究の結果と考察

運転研究は連続110時間の運転試験を含む十数回の試験により行なわれた。以下その結果と考察をとりまとめて述べる。

(1) 電 極

図5はセラミック電極と金属電極を使用した運転の特性である。電極の平均熱流束の実測値、電極材料の熱伝導度、電極中にそう入したサーモカップルにより実測算出した電極の表面温度はセラミック電極で $1,500^{\circ}\text{C}$ 、水冷金属電極で $1,000^{\circ}\text{C}$ である。図5(a)で見ると同じ時点の開放電圧は双方の電極ともほぼ同じであるが、図5(b)からわかるように運転の初期を除いて短絡電流は金属電極のほうが高い。さらに運転後の点検によりセラミック電極は水冷金属電極より損傷が大きかったことから、セミホッ

ト電極(セラミック電極)についてはさらに大きな改善の努力を必要とすると考えられるので、以後の実験では水冷金属電極を使用した。

一方電極電圧降下は電極の温度が高いほど減少することから電極の温度は高いことが望ましいが、電気炉を使用した耐熱性に関する予備実験により、酸化・アルカリ腐食・粒界腐食などのためステンレス鋼は、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 近くになると減耗が著しく増加することが明らかとなった。

この傾向は発電ダクトによる発電実験では明らかに現われたので、電極の温度は 900°C を目標に設計した。かつ電極の作動流体に接する角の部分の減耗を防ぐため、水冷銅とステンレス鋼を組合せた複合構造により、電極表面の温度分布を限定するよう改良を施した。この改良により連続運転で電極の損傷は無いことが確かめられた。

(2) 絶 縁 壁

さきに述べた二種類の絶縁壁を使用した実験結果は図6に示すとおりである。空気膜冷却の場合の空気量は発電ダクト出口の重量流量の約5%である。

図6(a)から見ると各実験とも開放電圧は運転開始後数時間を経て約80V付近まで低下している。これはシード物質の付着による絶縁壁の電気抵抗の低下によるものと推定され、電極の対地絶縁抵抗の変化およびダクト壁内にわずかなではあるが、カリウム化合物が付着していることからそのように推定される。

図6(b)は発電ダクトの電極の開放電圧の分布であって、ダクト構造により異なる。水冷分割金属片形(実験番号5)では開放電圧は発電ダクトの中央で最大となるが、空気膜冷却形(実験番号11)では流れ方向に沿って上昇している。

図7は熱流束の時間による変化を示すもので、一つの実験を通じてはほぼ一定である。開放電圧と同じようにダクト構造によって異なり、水冷分割金属片に比べて空気膜冷却構造は25%も少ない。これらの相違は冷却空気膜の影響と考えられる。

図7の空気膜冷却構造による実験番号11にa, bの二つがあるのは、一度電源の故障による装置のトリップ後、発電ダクトの分解補修を全然行なうことなく再起動したものである。

図8は空気膜冷却ダクトの長時間運転におけ

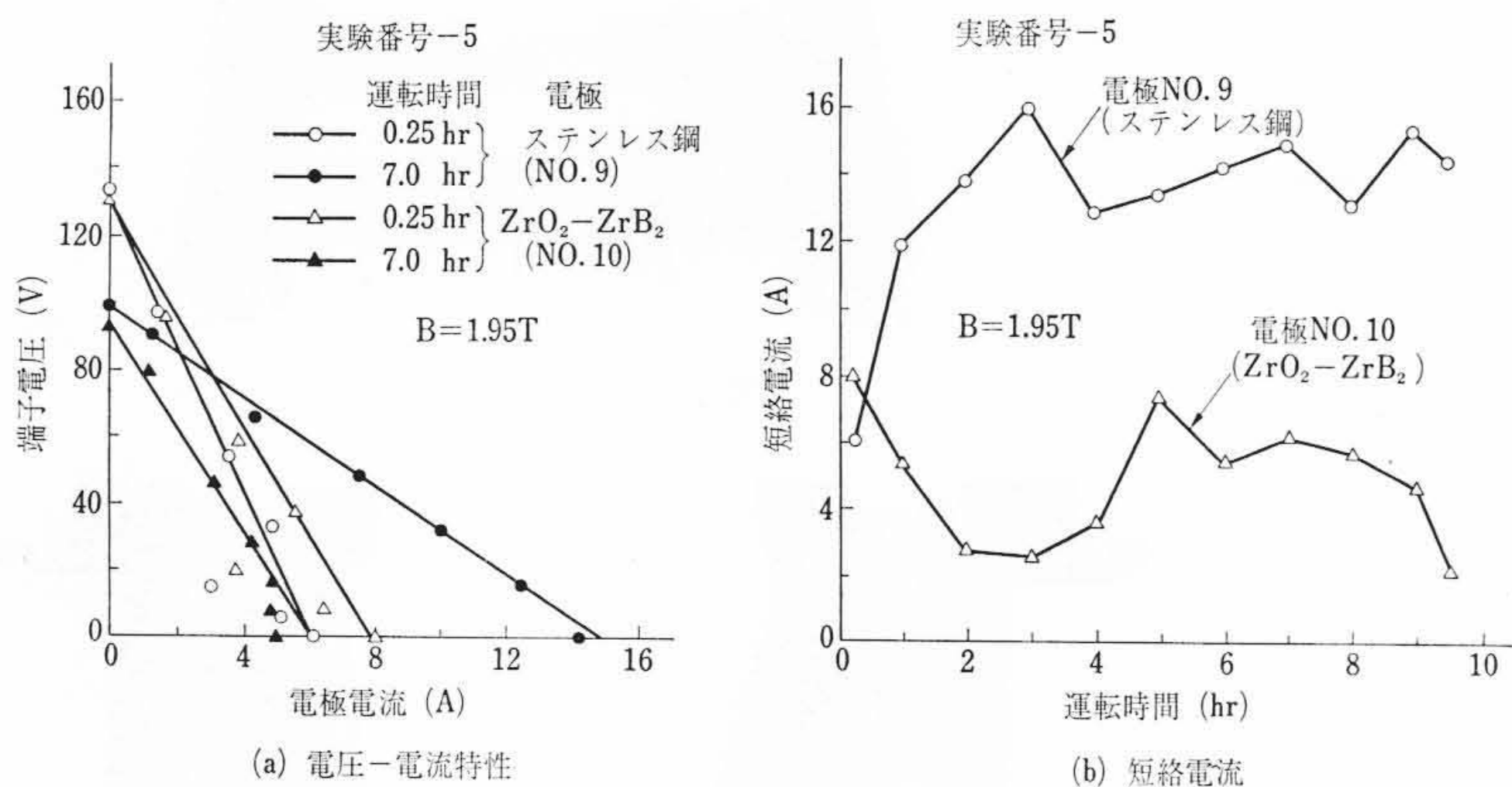


図5 運 転 特 性

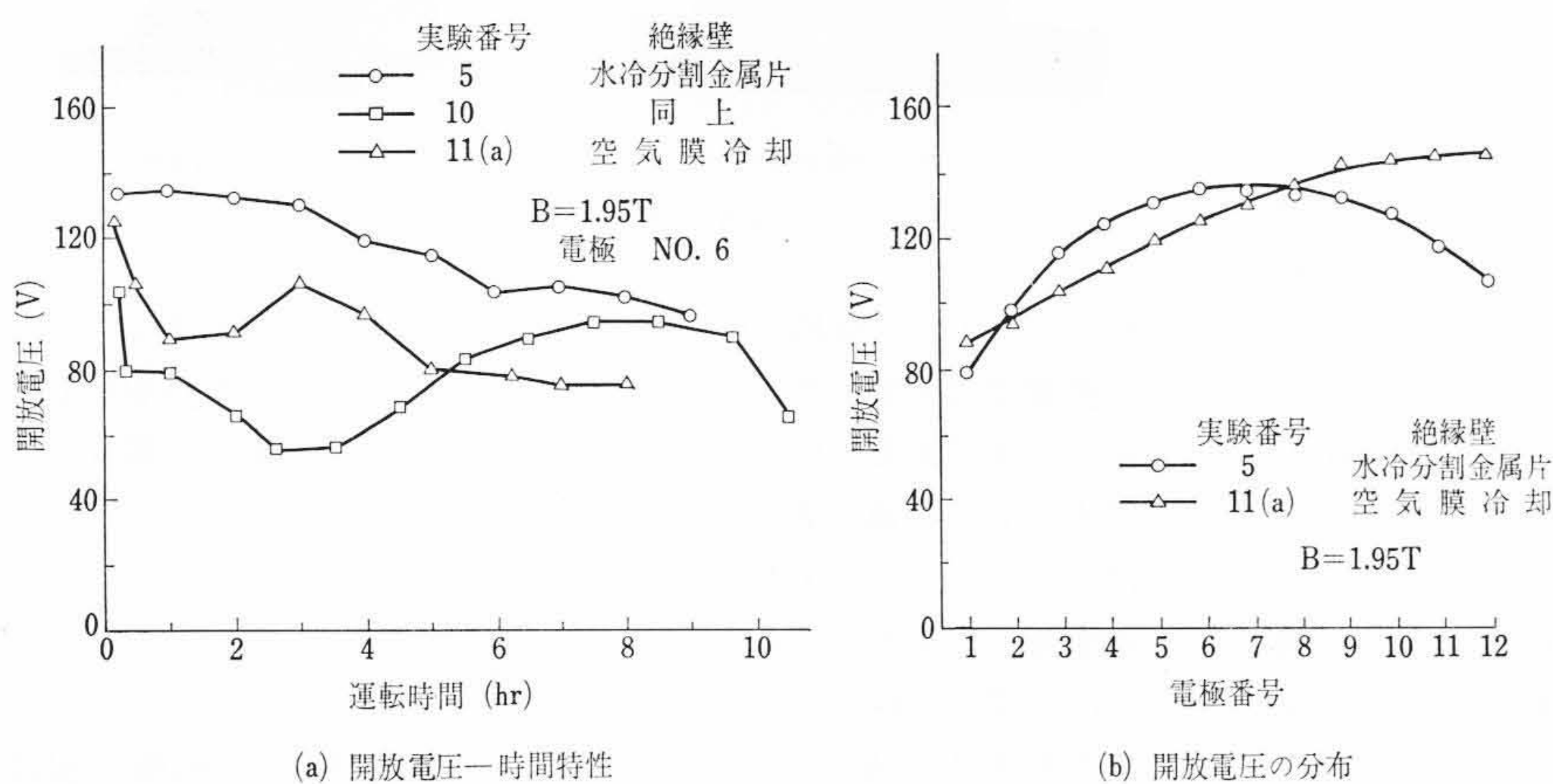


図6 絶 縁 壁 の 特 性 比 較

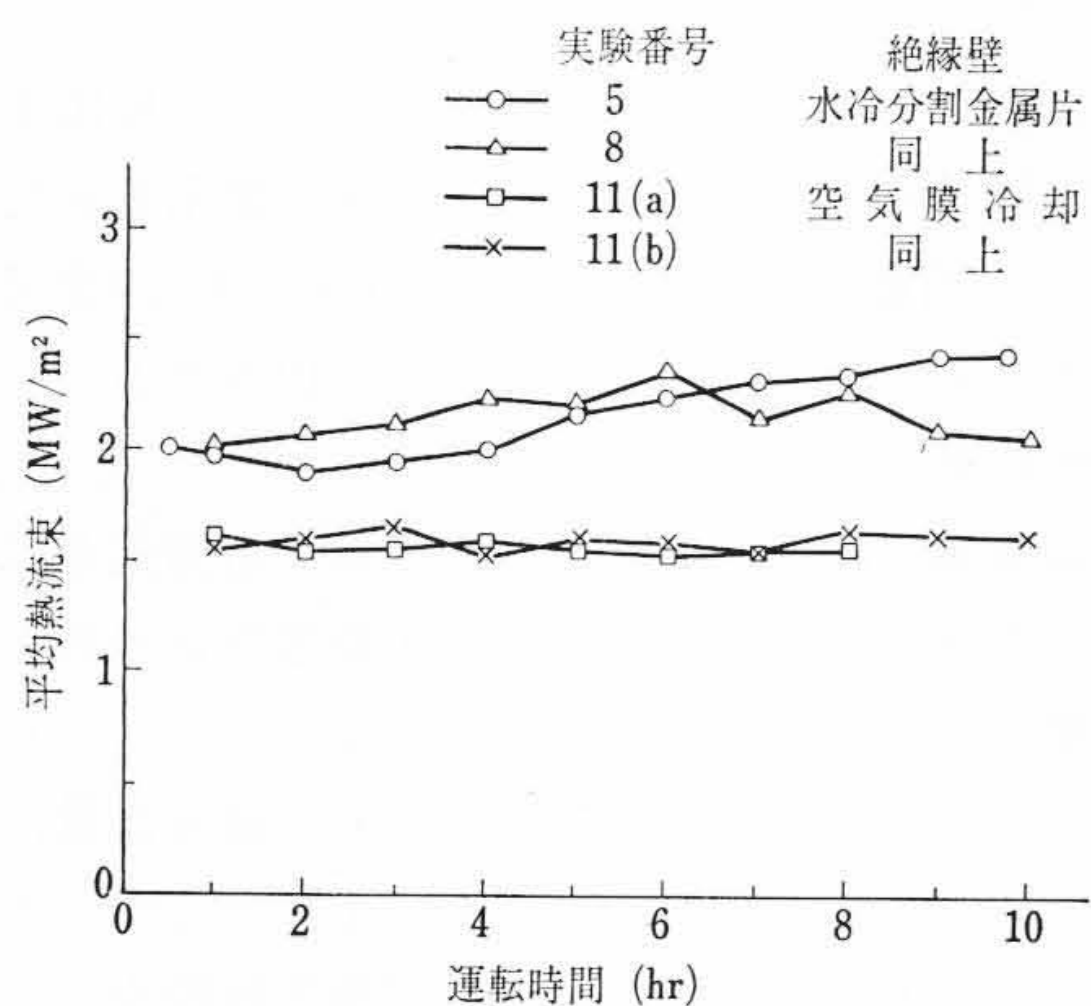


図7 熱 流 束

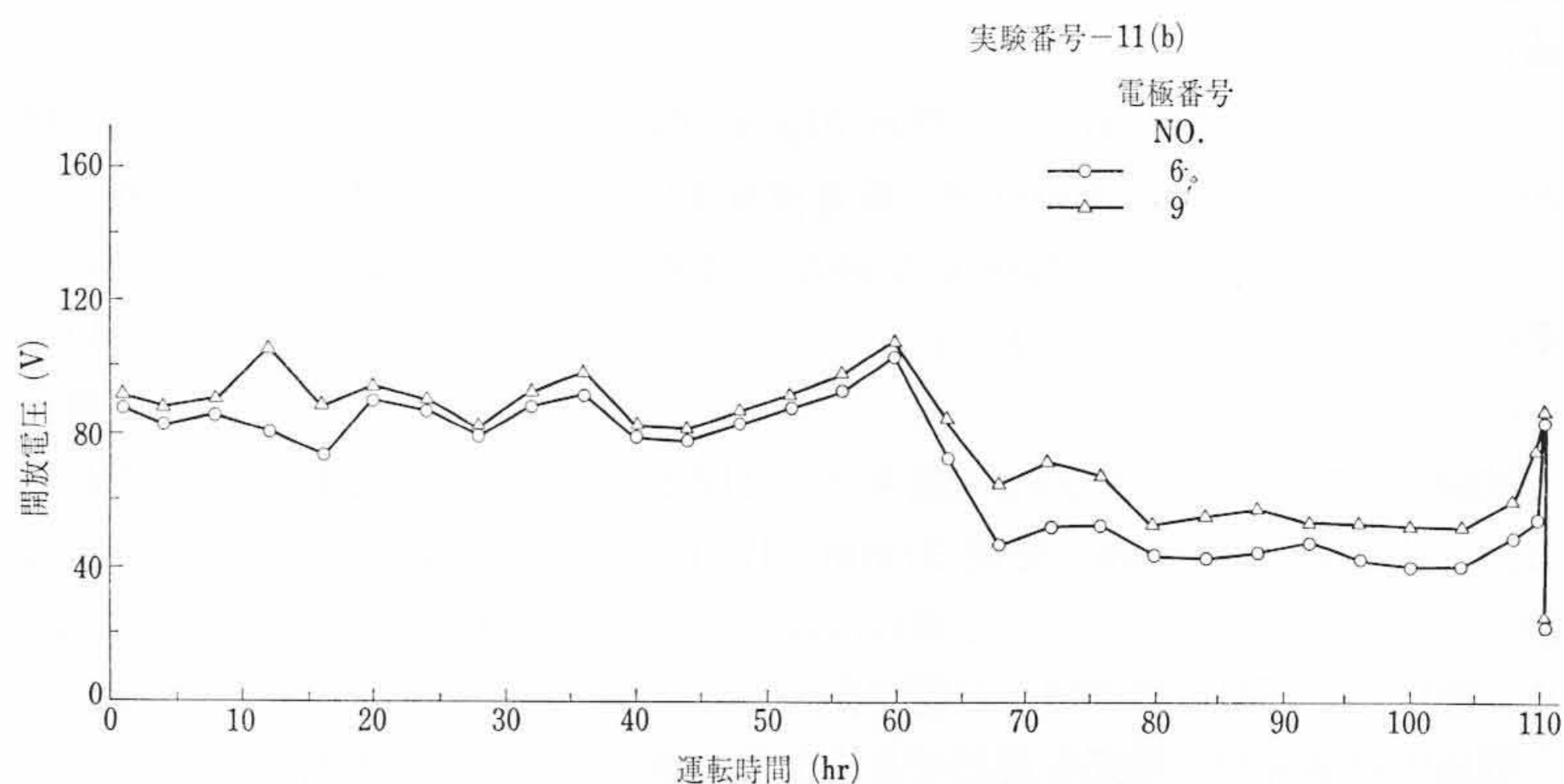


図8 長 時 間 運 転 特 性

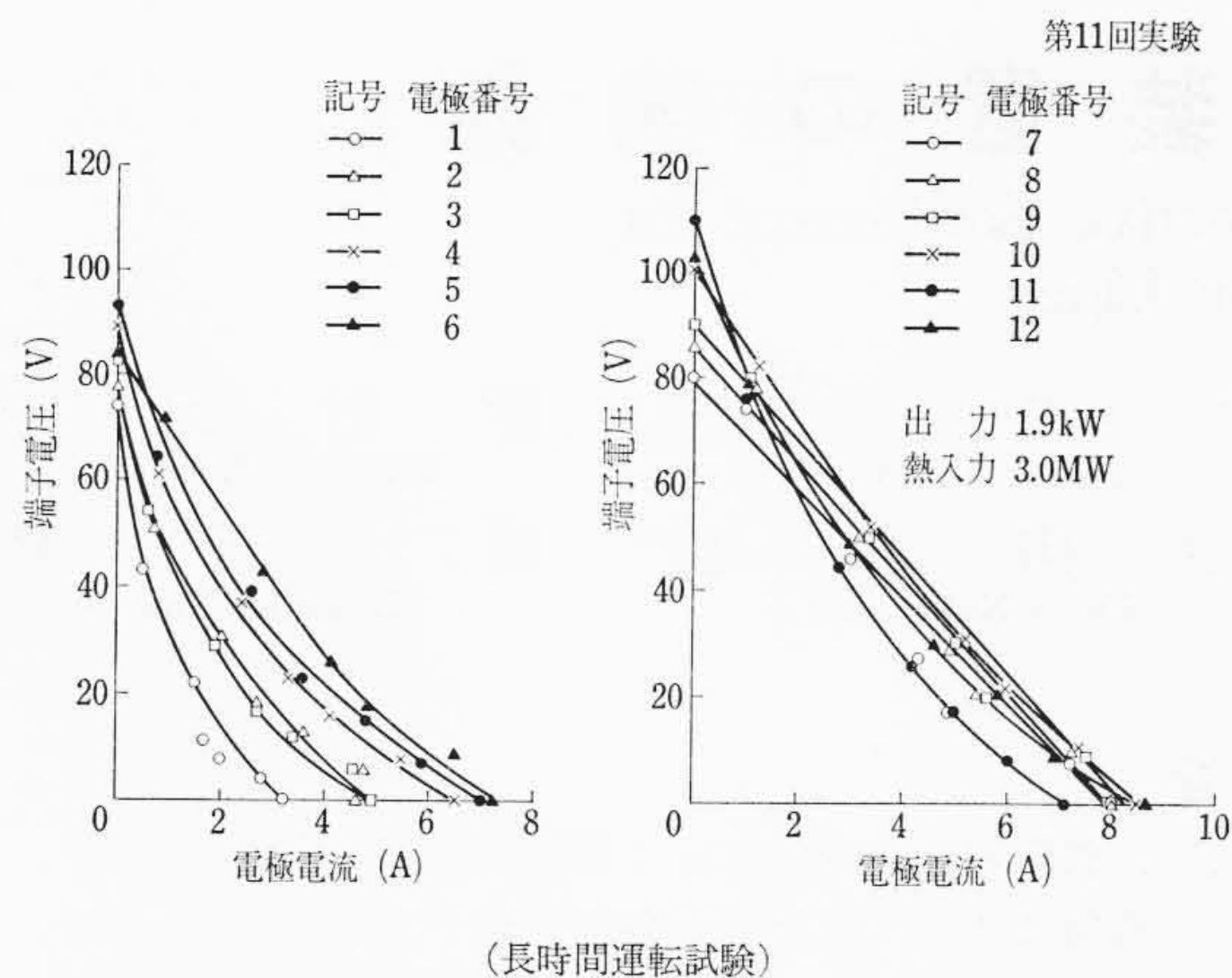


図 9 空気膜冷却発電ダクト電圧-電流特性

る開放電圧の時間的変化を示したもので運転条件は最後の 1 時間を除いて全く同一に保たれている。最初の 60 時間を経過したのち徐々に低下を見るが再び定常となっている。運転後発電ダクトの調査でアルミナ溶射が局部的にはがれている部分が見い出された。運転の経過を総合してこの局部的なハク離が上に述べた電圧の低下の一因と推定される。アルミナ溶射被膜の耐久性を確認するため引き続いて試験片について発電実験と同じ条件で耐久性試験を行なったところ 100 時間の運転でなんら損傷の無いことが明らかにされたことからアルミナ被膜のハク離がごく局部的に限定されていることを考慮に入れれば、今後この方式の発電ダクトは耐久性についてじゅうぶんな期待がかけられると考える。図 8 の運転時間の最後の 1 時間の電圧が上昇しているのはこのとき熱入力を約 25% 増加しダクトの機能上の損傷の程度を実験的に確かめたものである。長時間運転の最後の段階でなお熱入力の増加による出力の増加を見ることができたのは、空気膜冷却発電ダクトの高い耐久性を示すものである。この回の実験での発電特性の一例は図 9 に示すとおりである。また同じ発電ダクトの最大熱入力における特性を示したのが図 10 である。

なお本試作研究の対象としたほかの構造の発電ダクトすなわち水冷分割金属片形の発電ダクトについても数回の長時間運転を行なった。最初の 10 時間程度では所期の発電出力が得られるがその後急速に開放電圧が低下し出力はほとんどゼロに近くなる。この原因は水冷金属片の冷却水の封水部が長時間の運転により劣化し水漏れを生ずるためである。この封水部は少なくとも分割金属片の数だけあり、本試作研究の発電ダクトでは 100 箇所を越えることから見てもわかるように数が多く、1 箇所漏水を生ずると急速に金属片間の絶縁物が劣化するため加速度的に耐久性が低下する。最初述べたアメリカ AVCO 社の例⁽¹⁾から見てもこの欠陥の克服のためには多くの検討すべき問題が残されていると考える。

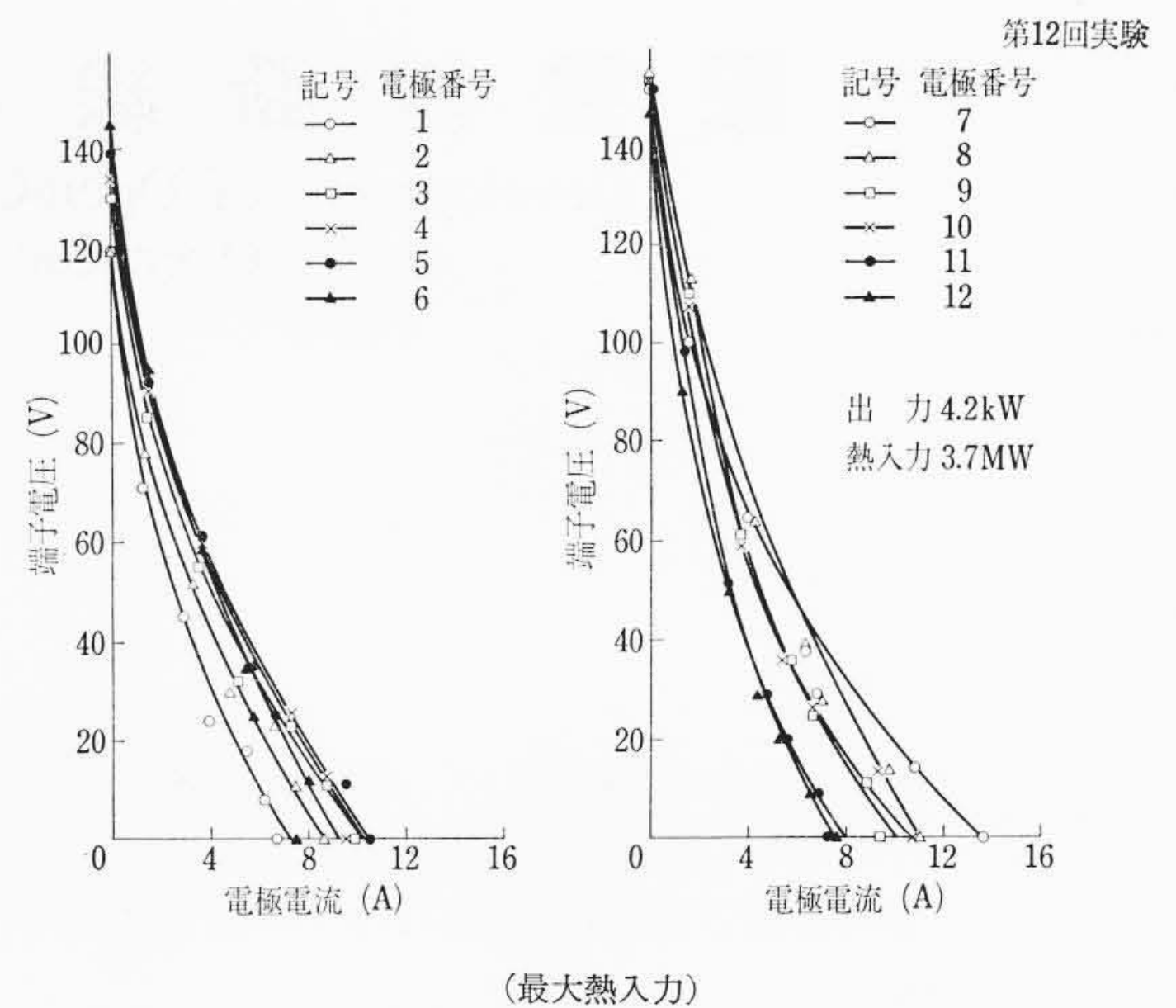


図 10 空気膜冷却形発電ダクト電圧-電流特性

5. 結 言

以上に述べた長時間運転用 MHD 発電装置の試作研究は将来の大規模な中央火力発電所に設置を予想される MHD 発電機と同じ作動流体の温度・流速の下で行なわれた。

発電ダクトはこの試作研究の過程で新たに開発された空気膜冷却方式絶縁壁と水冷金属電極とによるもので、目標とする連続 100 時間を上回る運転を行なうことができた。

試作研究の過程において水冷分割金属片構造(ペグウォール)との比較試験を行なったが、この構造は現状では 10~20 時間の範囲で大きな障害があることがわかった。

MHD 発電の実用化までにはまだ多くの研究課題が残されているが、本試作研究により長時間運転の一段階を達成できたことは、今後期待される材料の性能向上とあいまって、MHD 開発のうえに大きく一步を踏み出したものと思う。

本試験研究の遂行に当たって、電気試験所森所長、伏見部長、東京工業大学森教授、東京大学関口教授のご指導を仰いだ。また日立製作所では田口常務取締役、日立工場田附副工場長・西部部長、機電事業本部浦田部長、日立研究所玉木前部長、片木・川島各部長、佐々木・神力各主管研究員のご指導をいただいた。また日立研究所田野崎・丹野・幡谷各主任研究員、小杉・中村・玉村各研究員・朝日研究員補のご協力をいただいた。

以上のかたがたに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) A. C. J. Mattson, T. R. Brogan International Sympo. on MHD Generation (Salyburg) SM-74/168 (1966)
- (2) F. Mori, K. Fushimi, E. Ishibashi, Y. Sasaki, T. Kasahara, Y. Kazawa et al International Sympo. on MHD Generation (Warsaw) SM-107/91
- (3) M. E. Novack, T. R. Brogan ASME Publication 63-WA-348
- (4) T. Hara, M. Uchida Japanese Journal of Applied Physics Vol. 7, No. 2, p 163 (Feb. 1968)