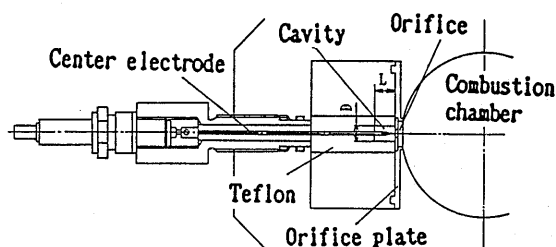
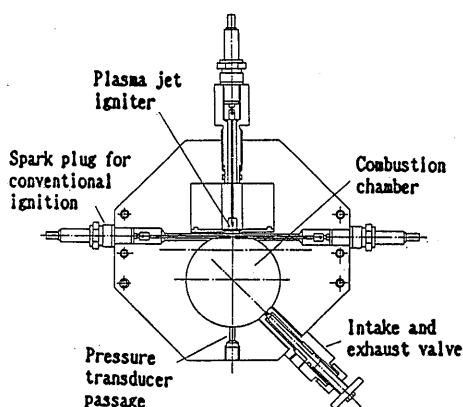


Fig.6.2.6 燃料消費率に与えるプラズマジェットの効果<sup>36,64)</sup>

吉田<sup>31)</sup>は火花点火機関にプラズマジェットプラグを用いて希薄混合気を確実に点火し、燃焼促進効果のあることを示した。Fig.6.2.7にプラズマジェットプラグと定容燃焼容器を示す。



a) プラズマジェットプラグ



b) 定容燃焼容器

Fig.6.2.7 プラズマジェットプラグと定容燃焼容器<sup>65)</sup>

Orrinら<sup>32)</sup>はプラズマジェットプラグの実験を行った。Fig.6.2.8にこのプラズマジェットプラグの例を示す。この特徴は先端のキャビティの中で放電をおこなわせ、それによって生成された活性粒子が加熱されて膨張したガスとともに、オリフィスを通り抜けて高速で燃焼室に噴射される。これによって燃焼室内に激しい乱れを作るとともに、活性粒子を室内にばらまくことにより燃焼を著しく促進させる。オリフィスの幾何学的形状やキャビティ内のガスを変えることによって、ジェットのパターンや活性粒子の種類を制御することが可能である。

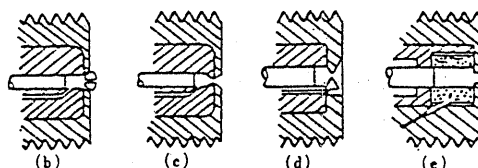
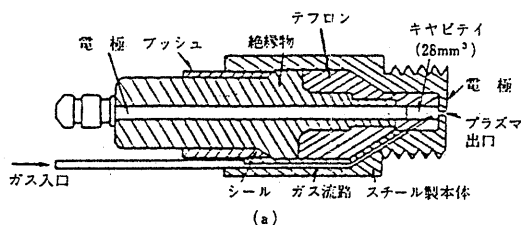


Fig.6.2.8 プラズマジェットプラグの例<sup>36,66)</sup>

Carletonら<sup>33)</sup>はプラズマジェットプラグではプラグに与えられた電力の内、プラズマに与えられるものは元のエネルギーの10%程度に過ぎないことを示した。この為エネルギー損失をできるだけ少なくして、普通のプラグと同じ電力でプラズマジェットをつくる工夫を考えている。

プラズマジェットによる燃焼促進に関する文献は上述の他に燃焼シンポジウムで幾つか発表<sup>34-36)</sup>されている。

(3) MHD発電

MHD (Magneto-Hydro-Dynamics電磁流体力学) 発電<sup>37-39)</sup>はファラデーの法則に基づき、導電性流体 (高温プラズマや液体金属) を磁場中に設けた発電ダクトに流し、その壁に設けた電極から電気出力を取り出す。Fig.6.2.9にMHD発電の原理を示す。

MHD発電のうち研究開発が一番進んでいる開放サイクル型では石炭、石油や天然ガスなどの化石燃料を

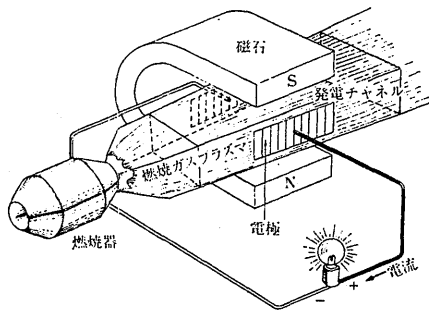


Fig.6.2.9 MHD発電の原理<sup>72)</sup>

高温燃焼 (2,200–2,900K) させ、それに燃焼ガスの導電性を高めるためにシード物質として電離電圧の低いセシウム化合物やカリウム化合物を1%程度混ぜている。発電ダクト材料保護のためにプラズマ温度は3,000K以下に限定されている。MHD発電では発電

ダクト出口でもガス温度はなお2,000K以上あり、この高温排熱の一部は燃焼用空気の前熱に用い、残りを蒸気ボイラに用いるMHD発電と蒸気タービン発電 (超電導発電機を使用すると効果的である) とのコンバインド・サイクルが考えられている。Fig.6.2.10にMHD-汽力発電プラントの基本構成を示す。このコンバインド・サイクルにより現在の新鋭火力発電の効率を10%以上向上させることを狙いとしている。このためにMHD発電では流速、磁場、電離度を高めることが必要である。そのために、ノズル加速(約1,000m/sec)、超電導磁場 (磁束密度は6 T程度必要)、シード物質を利用している。これらの面からも使いやすく、性能の安定した高温超電導物質の登場及び有効なシード物質の回収・再生法が待たれている。

閉サイクル型MHD発電では作動流体としてアルゴンやヘリウムを加熱しプラズマをつくる。プラズマ温度は2,300K前後と比較的低い。

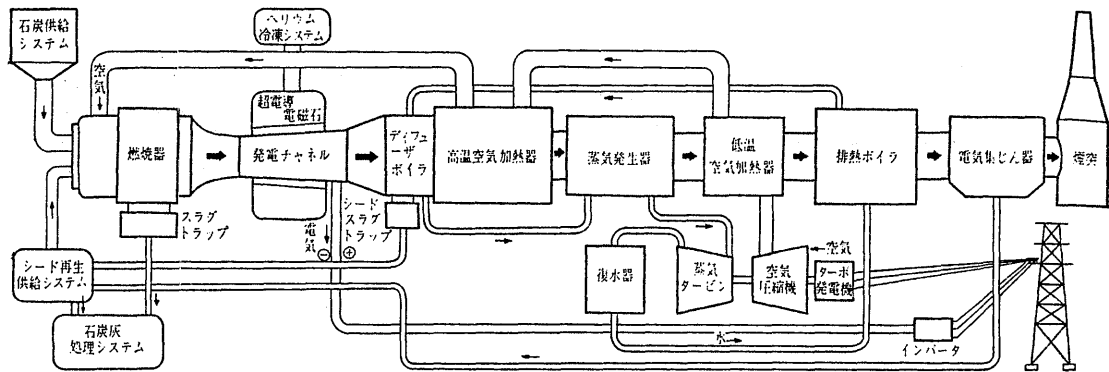


Fig.6.2.10 MHD-汽力発電プラントの基本構成<sup>72)</sup>

(4) 核融合

D(重水素)-T(三重水素)またはD-D反応を使う核融合炉<sup>40)</sup>ではそれぞれプラズマ温度1または6億度に達する超高温プラズマを磁場により安定に閉じ込め制御しなければならない。現在のところD-T反応を使うトカマク型核融合炉が限界プラズマ条件を一番早く達成するだろうと言われている。この核融合炉を実現 (安定したプラズマを温度1億度、密度百兆個/cm<sup>3</sup>、持続時間1秒間以上で閉じ込める必要がある) させるためには、プラズマ封じ込めに高磁場を発生できる超電導マグネットが必要不可欠である。

人類からエネルギー問題を開放してくれるといわれる

核融合炉の実用化までには乗り越えなければならないハードルは高くかつその数も多いので、その実現は21世紀後半になるものと言われている。

6.2.4 燃焼に及ぼす磁場の効果

(1) 火炎への影響

林ら<sup>41)</sup>、若山ら<sup>42,43)</sup>は火炎に磁場をかけた場合の火炎に及ぼす影響を調べた。その結果、燃焼反応では火炎中の寿命の短い活性種の発光が観測され、そのスペクトルの磁場効果はゼーマン効果による。火炎中の活性種の発光強度も磁場により影響を受ける。酸素-水素炎、プロパン-酸素炎ではOHラジカルの発光強度は磁場 (1.8T) の存在下で増加する。磁場をかけ

て燃やすと化学種により火炎が明るくなるもの、火炎が暗くなるもの、火炎が変化しないもの、燃焼条件によって火炎が明るくなったり暗くなったりするものなどに分かれる。すすの場合は磁場強度により火炎が明るくも暗くもなる。火炎の磁場効果のメカニズムとして磁場による荷電粒子の螺旋運動によって火炎がかき混ぜられること、燃焼反応の素過程の一部に磁場が作用すること、または化学種の発光過程に磁場が作用することが考えられると延べている。

上野ら<sup>44-47)</sup>は白金面上でのベンジン、アルコールの触媒燃焼反応に0.1-1.0Tの均一磁場を加えた場合に燃焼速度が特定の磁場強度で促進されたり、抑制されたりすると述べている。メタノールは0.9Tの磁場でのみ平均燃焼速度が減少し、燃焼温度も降下する。特に、磁場1T、100T/mオーダの勾配磁場で燃焼温度が100-200℃低下することが測定された。また、燃焼温度変動の揺らぎの成分も速やかに増加する。0.9Tの磁場を除き、0-1Tの磁場ではそれらの変化はない。エタノール、プロパノール、プタノールもある特定の磁場強度で平均燃焼速度が減少する。勾配磁場を加えた場合は燃焼温度がステップ状に速やかに変化

し、温度分布が著しく変化する。燃焼温度はある位置で磁場強度と磁場勾配の積に比例して減少する。アルコール触媒燃焼に勾配磁場を加えた場合の燃焼温度計測は著しい抑制作用を示したが、これは常磁性酸素分子と反応中に現れるラジカルの振舞いにより、燃焼部での常磁性物質の局所濃度変化が酸化反応すべき物質の結合チャンスを減少させていると考えている。Fig. 6.2.11に勾配磁場をかけた時のメタノールの燃焼温度変化を示す。また、メタン、プロパン、水素ガスを燃焼し、これらのガスの火炎を最大磁場1.6T、磁場勾配220T/mに曝したとき、火炎は高磁場から逃れるように曲がることを示した。また、炭素ガスと酸素ガスを最大磁場2.2T、磁場勾配330T/mに曝したところ、流速20-140ml/minの流れは磁場により止められたりして変化する。この火炎やガス流の磁場による変化は酸素の働きによる。勾配磁場中であろうそくを燃焼させたところ、火炎の形状が大きく変化することが観察されたと述べている。

現在までに行われた実験範囲では火炎に及ぼす磁場の効果は電場よりかなり小さいようである。

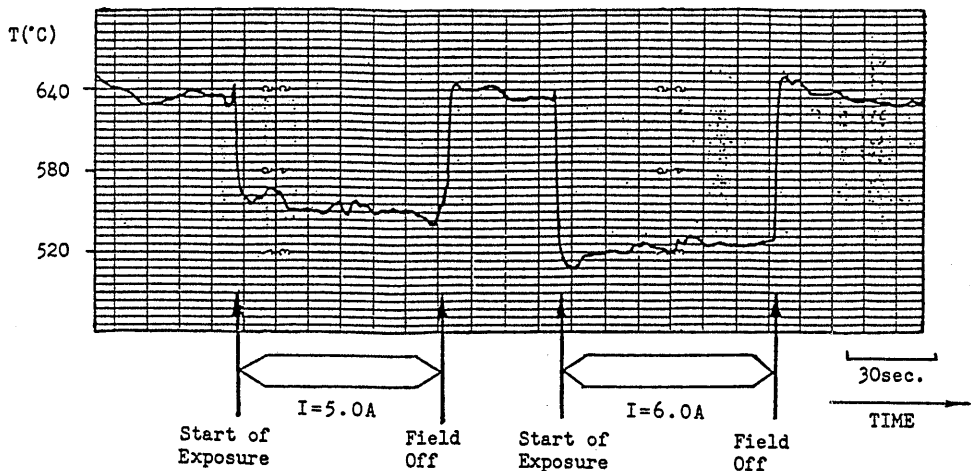


Fig.6.2.11 勾配磁場をかけた時のメタノールの燃焼温度変化<sup>79)</sup>

## (2) 燃料への影響

吉村<sup>48)</sup>は燃焼前の液体燃料に適正な磁場処理を施すと燃焼効果を高めると述べている。Fig.6.2.12に磁場処理を施したC重油の燃焼による煤塵(すす)の変化を示す。灯油に1.4-3.6kGの磁場をかけたとき、

すすは少なくなる。ボイラや火炉では燃料油に磁場処理を施すとほぼ1%の燃費節減、ガソリンエンジンでは10%以上節減が得られる。船用ディーゼルやディーゼル車では配管振動や燃料噴射ポンプによる振動流のため磁場処理の効果が確かでない述べている。

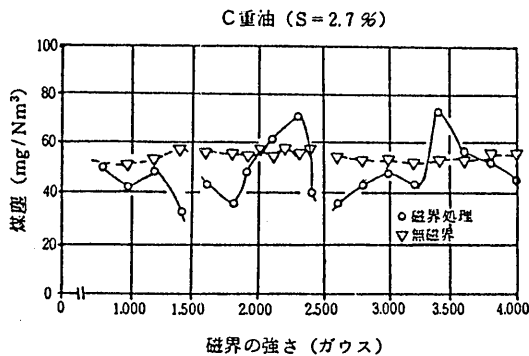
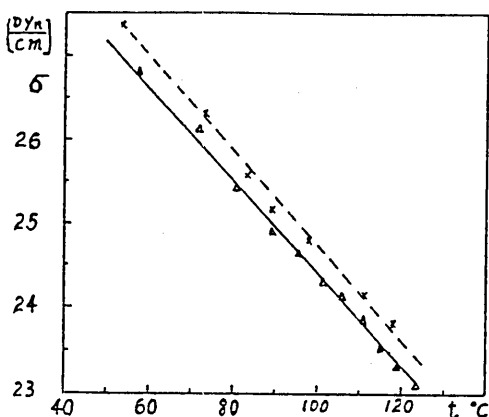


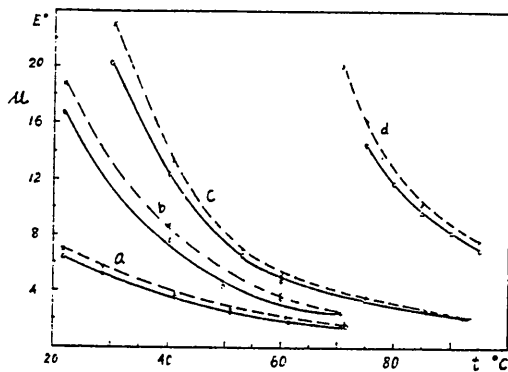
Fig.6.2.12 磁場処理を施したC重油の燃焼による煤塵の変化<sup>82)</sup>

Chenら<sup>49)</sup>は重油の表面張力、粘性が磁場をかけると低下すると述べている。Fig.6.2.13に磁場による表面張力と粘性係数の変化を示す(実線は磁場をかけた後を、点線は磁場をかける前を示す)。適当な磁場をかけると、燃料液滴の平均粒径の微細化、分散が良くなる。ガス及び液体燃料の磁場処理による燃焼効率の向上のメカニズムについてはもっと磁場による燃料の物理化学的性質を調べる必要があると述べている。

これらの燃料に対する磁場処理は実際上全く効果が無いとも言われておりその評価は定かでない。省エネルギーに密接に関係する問題であるので、然るべき研究機関において燃焼に対する磁場処理効果及びそのメカニズムを詳細に評価する必要がある。



a) 表面張力



b) 粘性係数

Fig.6.2.13 磁場による表面張力と粘性係数の変化<sup>83)</sup>

### 6.2.5 まとめ

火炎に磁場、電場、プラズマを印加すると、燃焼の促進、省エネルギー、大気汚染物質の低減化等が計られる可能性があり、それらによる燃焼制御により高効率低公害エンジン開発の可能性はある。これらの研究は緒に付いたばかりであり今後の研究の進展が期待される。

将来の研究課題： 火炎に及ぼす電場、磁場またはプラズマの効果をレーザ干渉CT法<sup>50,51)</sup> (Fig.6.2.14に示す) による火炎の温度分布計測およびパルスレーザ・ラーマン法<sup>52)</sup> (Fig.6.2.15に示す) による火炎の多化学種濃度と温度の同時計測およびLDV (レーザ・ドップラ流速計) による火炎の流速分布、乱れ分布の計測などから詳細に比較検討する必要がある。

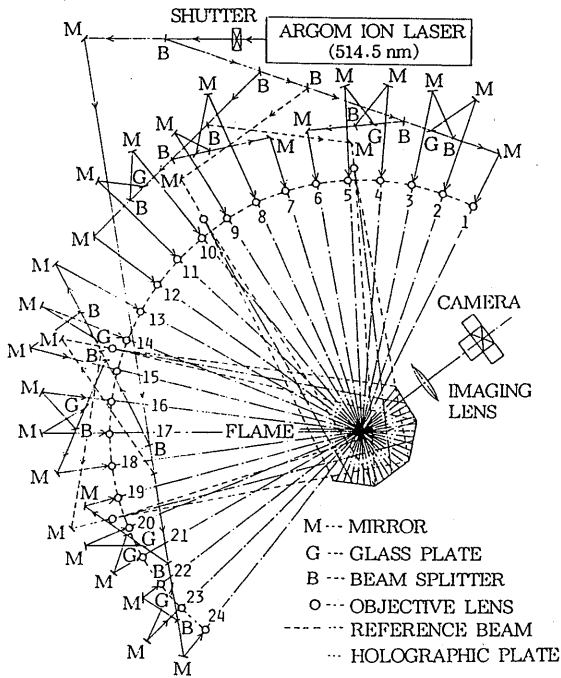
### 6.3 磁気分離および選別

磁石による磁気力を利用して、種々の物質を分離する手法を磁気分離技術と呼び1880年頃には、鉱山の選鉱過程で鉱石中から鉄や鉄磁鋼のような強い磁性体を分離するために使われた。

現在、磁気を使用した分離・処理法として以下のようものが使用されている。

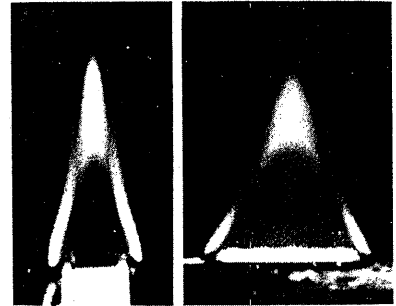
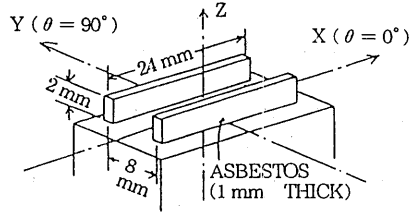
- 1) 高勾配磁気分離技術(HGMS, High Gradient Magnetic Separation)による選別
- 2) 磁性流体を使用した比重差選別
- 3) 水の磁気処理

まず、高勾配磁気分離技術による選別の原理は、均一磁界中では磁性体粒子の両極に作用する力の大きさが等しく反対方向のために粒子に働く力は、結果とし



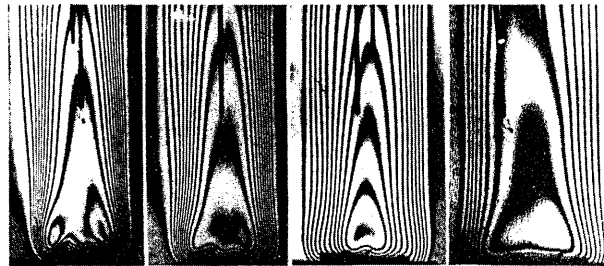
a) 多方向ホログラフィ干渉光学系

STRUCTURE OF ALCOHOL WICK



θ = 0° θ = 90°  
(X AXIS DIRECTION) (Y AXIS DIRECTION)

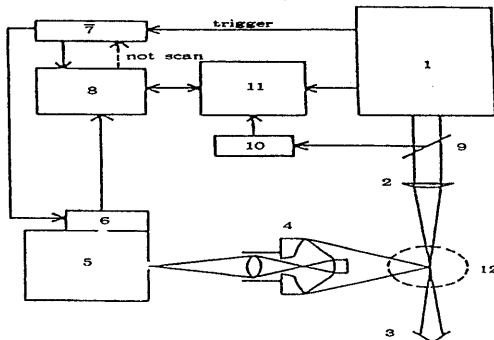
b) アルコール芯火炎



PROJECTION ANGLE 11.8° 26.5° 41.5° 78.1°

c) アルコール芯火炎干渉写真

Fig.6.2.14 レーザ干渉CT法<sup>84),85)</sup>



- 1 YAG laser: THG (355 nm), 10 MW, 10-20 KHz
- 2 Condensing lens: f = 500 mm
- 3 Beam stopper
- 4 Light collecting optics
- 5 Grating monochromator: f = 500 mm, single
- 6 Multi-channel detector: diode array, -20 C cooling
- 7 Pulsar: delay and exposure control
- 8 Controller: triggered by the laser
- 9 Beam splitter
- 10 Power meter; pin diode
- 11 CPU: 250 kbyte
- 12 Burner: diameter 12 mm

Fig.6.2.15 パルスレーザー・ラーマン法<sup>86)</sup>

て零になるが、不均一磁界中では磁性体粒子の両極における磁界の強さが異なるため、磁性体粒子に磁気力が作用し粒子は移動する。磁気分離の応用例をTable 6.3.1に示す<sup>87)</sup>。この磁気分離法とフェライト化処理法を組み合わせることによって2次公害のない重金属処理を行うことができる。ただ、廃液中に多くの物質が含まれていると処理行程が非常に複雑になるために、初めからそれぞれに対応した分別貯留と他の処理法と組み合わせた処理システムを作る必要のあることが提案されている。

つぎに、磁性流体を使用した比重差選別は、磁性流体が加えられた磁場によって見かけの密度を変化させることを利用したものである。分離したい物質は等磁場面に沿って移動し、磁場の影響しない場所で沈降し

て分離される<sup>89)</sup>。なお、この磁性流体を使用した比重差選別に関しては、6.4.4節において再びふれる。

最後に、水の磁気処理についての検討が種々報告されている。ただ、その評価については現在のところ十分とは言えないようである。水の磁気処理についての基本的な考え方は、水分子が持つ双極子モーメントが磁場中で受ける力により発生する僅かの物性変化が水処理に寄与していると考えられている。期待される効果としては、スケールの生成抑止と除去、水中微生物の除去、腐食防止が取り上げられている。ただ、装置がうまく起動するためには、一定の流速が必要であり、また、磁場強度が特定の値を取るらしいことが述べられている<sup>90),91),92)</sup>。

Table 6.3.1 HGMSの種々の分野における応用例<sup>87)</sup>

応用分野	応 用 例	ランク
(1) 水 処 理	(a) 廃水中の重金属処理	A, B
	(b) 用・廃水、河川水の処理	C
	(c) 鉄鋼廃水の処理	A
	(d) 火力・原子力発電所系統水の処理	C
	(e) 地熱発電所排水の処理	D
	(f) 食品工業用水中の鉄分除去	C
	(g) 流出油、エマルジョンの処理	C
	(h) 赤潮の処理	C
(2) 空 気 浄 化	(a) 電気炉、転炉、焼結炉排ガスの集塵	C
	(b) 吸入性ダスト(アスベスト繊維)の除去	C
(3) 磁 気 選 鉱	(a) 鉄鉱石の磁気選鉱、品位上昇	A
	(b) 低品位マンガン鉱石(タングステン鉱)の粗選	A
	(c) 金属アルミとアルミナの分離	A
(4) 窯業原料の品位上昇	(a) カオリンなど陶土、硅砂中の不純物除去	A
(5) 資源採取	(a) 海水中からのウラン採取	C
(6) 燃料中の不純物除去	(a) 石炭、液化石炭の脱硫	C
	(b) 原油中の金属除去	D
(7) 有用物回収	(a) 有価金属の回収	B

ランクA：実用化されているもの      C：研究中で有望であるもの  
B：実用化されつつあるもの      D：検討中のもの

## 6.4 磁性流体

### 6.4.1 はじめに

1930年代の初めにF. Bitterは磁区構造を可視化して調べる一方であるコロイド法(ピット法)用にマグネタイト( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )微粒子のコロイド溶液(磁性流体)を作製した。しかし、この磁性流体はコロイド溶液として不安定でありそれ以上発展しなかった。本格的な磁性流体は1965年にNASA(米国航空宇宙局)のS. Papellによって発明された。その頃NASAはアポロ計画を遂行中であった。そのため、宇宙服の可動部分の密閉シールや無重力下での液体ロケット燃料の管内移送を磁石を利用して制御することなどを目的として磁性流体の応用研究・開発が始まったと言われる。1969年にアポロ計画によって、人類が初めて月着陸船で月面に着陸し、宇宙飛行士が月面上を歩行した。その宇宙飛行士が着ていた宇宙服内部を外部の真空から1気圧に保って、頭部のヘルメットを自由に回転させるために宇宙服には磁性流体真空シールが使われていたと言う。磁性流体はその時からにわかに脚光を浴びることとなった<sup>93)-95)</sup>。

磁性流体(ferrofluid, magnetic fluid)は水やケロシンなどの非磁性ベース溶液に多量の強磁性体の金属超微粒子(直径約 $100\text{\AA}=10\text{nm}$ 、 $10^{17-18}$ 個/ $\text{cm}^3$ )を強力な界面活性剤を加えて、合体、凝集を防止し、安定に分散させたコロイド溶液である。この磁性流体粒子の分散モデルをFig.6.4.1に示す。標準状態の空気

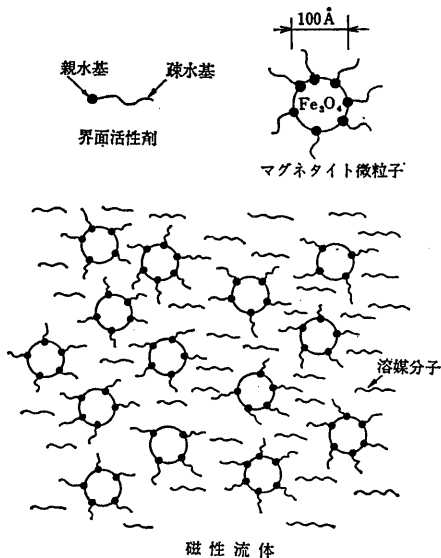


Fig.6.4.1 磁性流体粒子の分散モデル<sup>95)</sup>

の分子数は $2.7 \times 10^{19}$ 個/ $\text{cm}^3$ であるので、この強磁性体金属超微粒子が如何に小さいものであるかが想像できる。金属超微粒子はマグネタイト、マンガン亜鉛酸化鉄( $\text{Mn} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )などを使用し、粒子はほぼ球形である。金属超微粒子が互いに接触せず、反発しあうように親水基を超微粒子側に、疎水基を外に向けたオレイン酸などの界面活性剤の長鎖状分子でコーティングし、ベース溶液に分散する。超微粒子はベース溶液中でブラウン運動する。この磁性流体は分散性に優れており、遠心力や重力の作用下で、凝集や沈降などの固液分離を生じるようなことがなく、液体自体が均質で強い磁性を持っているように振舞う<sup>94),95)</sup>。

磁性流体に関する主な文献として磁性流体の構造、性質、オレロジ、流体力学といった基礎分野に重点をおいて詳しく書かれたRosensweigの本<sup>96)</sup>、応用についても言及した彼の文献<sup>97)</sup>及び磁性流体の製法、基礎、応用にわたる広範囲について書かれた竹富・近角の優れた本<sup>95)</sup>がある。また、文部省科研費による磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書<sup>98),99)</sup>及び日本機械学会磁性流体工学に関する調査研究分科会成果報告書<sup>100)</sup>がある。文献(98)と(100)とは内容に重複が多い。日本では1986年から毎年、磁性流体講演会<sup>101)-103)</sup>が開催されている。一方、磁性流体国際会議の第1回は1977年にイタリアで、第2回は1980年に米国で、第3回は1983年に英国で、第4回は1986年に東京と仙台で開催された。第5回は1989年にソ連で開催される予定である。第4回会議録<sup>104)</sup>には神山、Rosensweigによりその時点までに公表された磁性流体に関する文献及び特許のリストがそれぞれ約500件づつ掲載されている。

次に、磁性流体の特徴について述べる<sup>105)</sup>。

磁性流体のマクロ的性質として、

- 1) 磁場の作用下で磁性流体は重力、圧力、遠心力などに逆らって磁氣的に任意な位置付けができる、
- 2) 磁性流体中に置かれた磁性体は安定した状態で浮揚する、
- 3) 磁性流体中に置かれた非磁性体は磁性流体の比重を磁氣的に制御することによって自由に浮遊位置付けができる、
- 4) 磁性流体を加熱、冷却することによって生じる磁気熱サイクルは機械的駆動部なしに流体運動を起こす、
- 5) 接線方向の磁場により表面波動の伝播が制御できる、

- 6) 磁性流体に回転磁場を作用させると磁性流体中に渦が発生する、  
 7) 磁性流体は磁場の作用下で凝集する、  
 などである。

磁性流体のミクロ的性質（磁気光学的性質）として、

- 1) 複屈折（光学的異方体に光が入射するとき、一般に二つの屈折光が現われる現象）
- 2) 二色性（光が媒質中を通過するとき特定の振動面を持つ直線偏光、または特定の向きの方偏光が強く吸収される現象で、前者を直線偏光二色性、後者を円偏光二色性という）

を示す。

Table 6.4.1に磁性流体の応用分野<sup>105)</sup>を示す。以下に磁性流体の応用例について述べる。

Table 6.4.1 磁性流体の応用分野<sup>105)</sup>

利用される性質		応用機器
磁性	磁性流体に働く力、流動性	インクジェットプリンタ、検知装置（位置センサなど）、磁気潜像の現象および定着、磁気テープ、不良個所のマーク付けと選別、磁性薄膜、水位計、比重計、圧力計、磁性流体研磨
	凝集性	光ファイバ接続装置
磁場中の磁性流体に働く力、磁場による位置決め、形状変化	シーリング作用	回転軸シーリング装置、機械部分のないポンプ、バルブのシール、アクチュエータ
	潤滑作用	軸受、回転装置、引抜き加工装置
	粘性	ダンパ
その他	表示装置、油水分離、制ガン剤の誘導	
磁性流体中の物体に働く力	操重力効果	比重差選別装置
温度による磁性の変化	磁性流体に働く力	ヒートポンプ、エネルギー変換機
	温度特性	温度計測装置、温度制御装置
	熱交換	熱交換装置、変圧器、ヒートパイプ、スピーカのボイスコイルの保持
磁気光学効果	複屈折	磁場センサ、光シャッター、光モジュレータ、ディスプレイ、光信号増幅器
	二色性	偏光子

#### 6.4.2 磁性流体軸シール

磁性流体の応用として、磁性流体軸シールは現在のところ最も成功しており、広く実用化されている。

熊谷ら<sup>106)</sup>は液体水素輸送船の補機に関する研究の中で磁性流体軸シールの実験及び検討を行った。その結果、磁性流体軸シールは比較的低压のガスシールに有効であるが、欠点として使用温度の上限は約60～100℃であり、その下限は-30～-50℃と使用温度範囲は狭い。しかし、低温圧縮機の二次シールとして使用する場合、この範囲にすることは可能であると述べ

ている。

最初の液体ヘリウムで冷却された超電導発電機はMITの4MVA機で、シールはカーボン・フェイスイールを用いた。ほぼ同じ頃にウエスティングハウス社で5MVA機が作られ、シールとして特殊なメカニカル・シールを用いた。それらのシールは寿命が短く実用に耐えなかった。超電導発電機への磁性流体軸シールの適用に初めて成功したのは富士電機・三菱電機共同開発による6MVA機からである。その後、GE社、日立製作所でも磁性流体軸シールを用いた超電導発電機が作られている。液体ヘリウム冷却超電導発電機ではヘリウムが高価であるので、冷却後の回収が必要である。また、ヘリウム流路に他のガス（O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>）が混入すると極低温のためにそれらのガスが固化して流路を塞いでしまうので、ヘリウム流路における回転子と固定部の接合部はシール性能の非常によい軸シールが必要となる。この目的に磁性流体軸シールは適している<sup>95),107),108)</sup>。

磁性流体軸シールが広く使われるようになってから、高速回転、大直径の軸シールへの適用が要求されるようになってきた。磁性流体軸シールも他のシールと同様に発熱がある。磁性流体軸シールの発熱は磁性流体の粘性が原因である。発熱量は軸径の3乗、回転数の2乗に比例するので高速回転、大直径の軸シールでは発熱問題は重要である。

磁性流体軸シールの特徴<sup>109)</sup>をまとめると、長所としては、

- 1) 非接触で完全密封型シールである、
- 2) 軸の静止時、回転時ともに密封性を保つ、
- 3) 固体面間の摺動がなく長寿命である、
- 4) 軸の変位、表面あらさに関して許容範囲が広い、
- 5) 構造が簡単でコンパクト化に適する、
- 6) 動力損失が小さい、

などである。

短所としては、

- 1) 磁性流体の耐熱性が小さく使用範囲が限られている、
  - 2) 高圧力差には適さない、
  - 3) 液体用及び往復動シールとしての使用は難しい、
- などである。

具体例としては上述の他に、計算機用磁気ディスクの防塵シール、高真空器内の回転軸の真空シール、電力貯蔵用大型フライホイールシステムの真空シールなどがある。



Fig.6.4.2に磁性流体軸シールの基本構成を、Fig.6.4.3に磁性流体軸シールの具体的な構造を示す。

現在、磁性流体軸シールはシール圧  $\Delta p < 200\text{kPa}$ 、使用温度  $T < 100^\circ\text{C}$ 、軸回転周速度  $v < 20\text{m/s}$  までの使用が広く普及している<sup>110)</sup>。

上述の文献の他にも磁性流体軸シールについては優れた解説<sup>111)-115)</sup>や論文集<sup>101)-144)</sup>、論文<sup>116),117)</sup>がある。

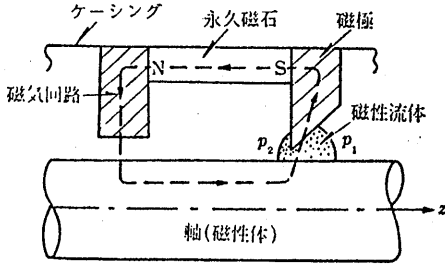
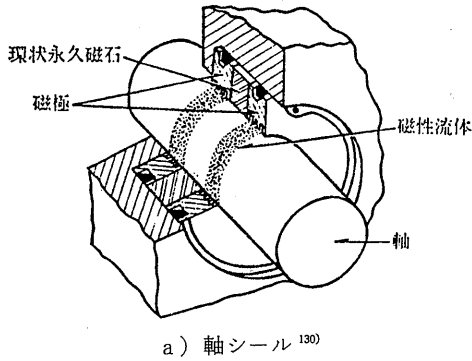
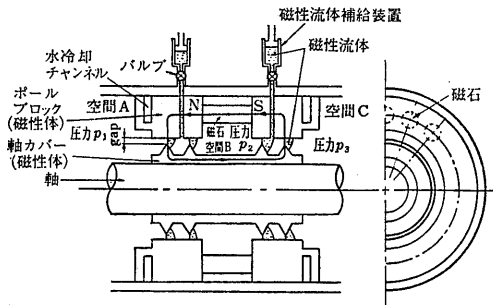


Fig.6.4.2 磁性流体軸シールの基本構成<sup>130)</sup>



a) 軸シール<sup>130)</sup>



圧力  $p_1, p_2, p_3$  は  $p_3 < p_2 < p_1$  となっている。

b) 軸シール<sup>111)</sup>

Fig.6.4.3 磁性流体軸シール

### 6.4.3 エネルギー変換装置

磁性流体は適当な温度勾配（キュリー温度近くにおける磁化強さの強い温度依存性を利用する）および磁場勾配の存在する領域内に置かれると、圧力勾配が発生して流動を誘起させる。

磁性流体を作用流体とした太陽熱暖房装置の基本形をFig.6.4.4に示す。磁性流体はコレクタと蓄熱・放熱器間に満たされ、その循環には自然対流及び可変磁力線源を使用し、蓄熱エネルギーを効率よく変換できる<sup>105)</sup>。

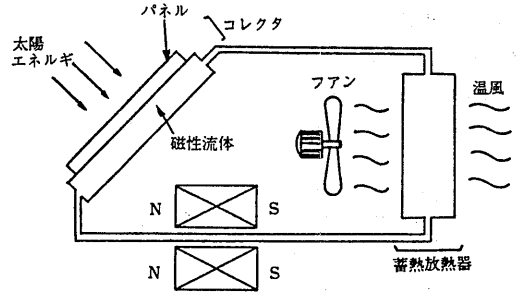


Fig.6.4.4 磁性流体太陽熱暖房装置の基本形<sup>105)</sup>

作用流体に磁性流体を使用したヒートパイプは磁性流体中の揮発性分散溶媒が液体の熱運動速度で還流するため、速い蒸発速度でも蒸発部の作用流体の不足が発生せず、従来の同一タイプのものと比較して2.5~4倍以上の伝熱効率を得られている<sup>105)</sup>。

磁性流体を使用した変圧器の原理をFig.6.4.5に示す。この変圧器は鉄心に相当する部分に磁性流体を使用し、かつ、この磁性流体を循環させて冷却・放熱も行わせるようにしたものである。磁性流体変圧器は油を用いて冷却・放熱を行わせる従来の変圧器に比べて放熱効率が高く、かつ小型化、簡略化でき、また油による公害の恐れもないなど優れた性能を有している<sup>105)</sup>。

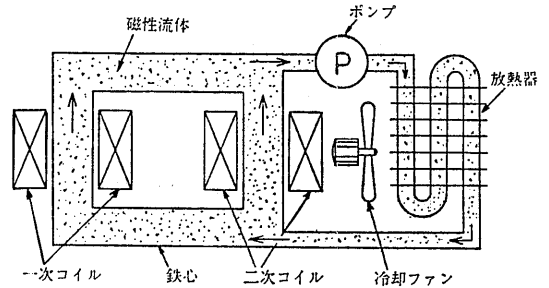


Fig.6.4.5 磁性流体変圧器の原理<sup>105)</sup>

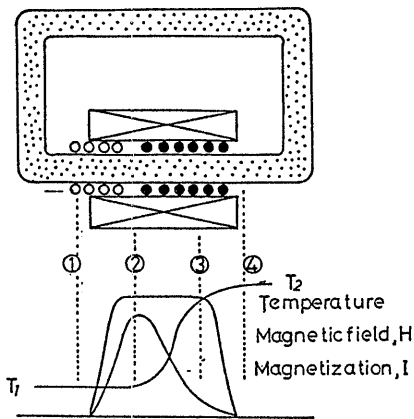
(磁性流体熱機関) Reslerら<sup>118),119)</sup>は磁性流体熱機関の提案を行い、実験の検証も行った。松木ら<sup>120)</sup>は磁性流体熱機関の実験を行った。しかし、それら初期のものは運動性が乏しいものであった。

土方ら<sup>121)</sup>は磁性流体熱機関の改善と磁気熱力学の検討を行った。ところで、この磁性流体熱機関はエジソンが磁性材料を用いて熱エネルギーを別のエネルギーに変換するという原理特許を1888年に英国で取ったことに始まる。細いパイプの中に入れた磁性流体に強力な永久磁石で強い磁界をかけながら、パイプの片側を12℃に冷却し、もう一方をニクロム線ヒータで70℃に加熱し、温度差をつくる。パイプの中の磁性流体は永久磁石の方に引き込まれるような力を受けるが、温度が高くなると磁化が弱まるため、低温部に比べると高温部の圧力が小さくなる。その結果、磁性流体は低温

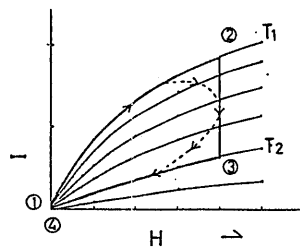
側から高温側に押し流されるように移動し始める。この状態にしておくと、パイプの中を磁性流体は巡り続け、磁性流体の流れの中に羽根車を置くと回転する。しかし、その回転力は非常に弱い。

Fig.6.4.6に磁性流体熱機関とそのサイクルのモデルを示す。磁性流体が①→②で等温的に磁化され、②→③で一定磁界中で加熱され、③→④で等温的に消磁される。④→①は断熱的に冷却され、1サイクルを終わる<sup>121)</sup>。

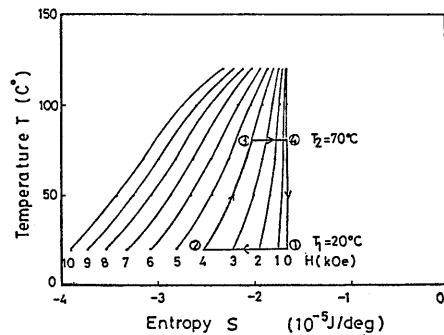
ベース溶液を熱伝導度の高い液体金属とし、これにキュリ温度以上の高温でも長期間安定な飽和磁化の大きい金属超微粒子を懸濁した磁性流体が得られるならば、可動部分がなくても熱エネルギーを効率よく電気エネルギーなどに変換することが出来るので、発電や熱機関として利用が可能となる<sup>105)</sup>。



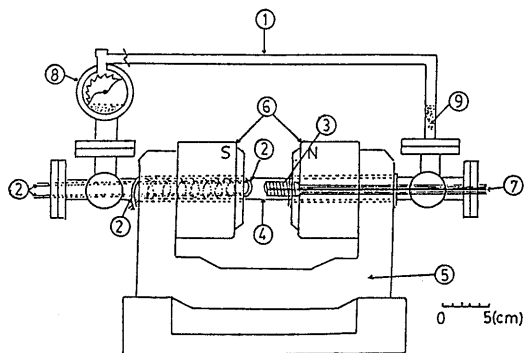
a) 温度分布及び磁界分布



b) サイクルの磁化-磁界線図



c) サイクルの温度-エントロピ線図



- 1 : パイプ 2 : 低温熱交換器 3 : 高温熱交換器
- 4 : パイプ 5 : 磁界発生装置 6 : 永久磁石
- 7 : 熱電対 8 : 羽根車 9 : パラフィンベースの Mn-Zn フェライト磁性流体

d) 磁性流体熱機関モデル

Fig.6.4.6 磁性流体熱機関とそのサイクル・モデル<sup>121)</sup>

6.4.4 磁性流体比重差選別 (6.3節参照)

垂直方向に磁場勾配を持つ境界中に磁性流体を充填し、その中に非磁性体をおき、これに働く力を  $F$  とすると、

$$F = V \left\{ (\rho - \rho')g - \bar{M}(dH/dx)/4\pi \right\} \quad (6.4.1)$$

で与えられる。ここで、

- $V$  : 非磁性体の体積
- $\rho$  : 非磁性体の密度
- $\rho'$  : 磁性流体の密度
- $g$  : 重力の加速度
- $\bar{M}$  : 非磁性体の位置における磁性流体の平均磁化
- $dH/dx$  : 磁場勾配、下向きに磁場が増加するときを正とする。

右辺の第1項は重力による沈降、第2項は磁気的浮力を示す。磁場が強いほど見かけの比重は大きくなり、比重3以上の重液を容易につくることができる。現実には比重8以上の重液にすることもできる。処理材と重液との分離可能比重差は0.1である<sup>122)</sup>。

磁性流体比重差選別装置による磁性流体の損失が現在のところ処理トン当たり1ℓ近くあり、磁性流体が高価なので、コスト高であるが、回収金属の単価が高価なものには有望である<sup>122)</sup>。Fig.6.4.7 に磁性流体比重差選別装置の原理とその例を示す。

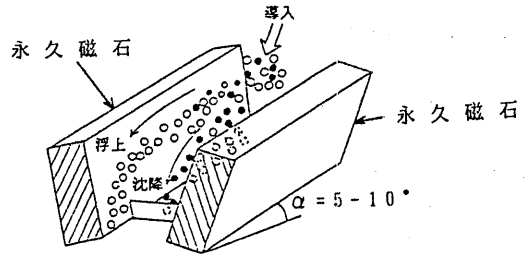
葛岡ら<sup>123)</sup>は坑水より回収したフェライト(マグネタイト-マグヘマイト固溶体)を用いた水ベース磁性流体(比重  $\rho=1.05$ ) 比重差選別装置を使い、塩化ビニール ( $\rho=1.45$ )、アルミ合金 ( $\rho=2.4\sim 2.7$ )、銅線 ( $\rho=8.9$ ) の混合物の回収実験をおこなった。その結果、磁場の強さ  $0.96 \times 10^5 \text{ A/m}$  で塩化ビニールは完全に回収され、 $1.35 \times 10^5 \text{ A/m}$  で銅線とアルミ合金を完全に分離できた。

鉱山から排出される鉄イオンを含む坑水は一般に中和処理されている。しかし、その結果多量の中和沈澱物が新たに発生し、その処理が問題となっていたが、最近混合法により坑水からフェライトを回収する技術が開発された。回収されたフェライトは粒径が微細であり、また水溶液懸濁物として存在するため安価な水ベース磁性流体の開発に適していると言う<sup>123)</sup>。

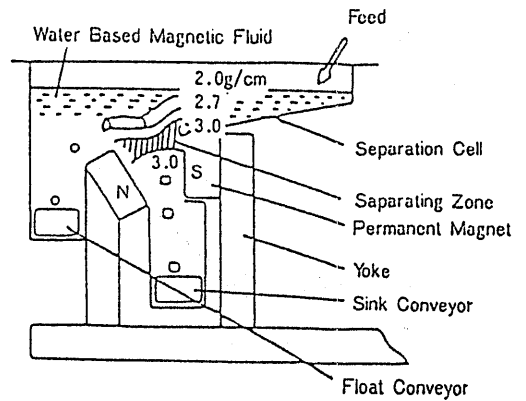
6.4.5 磁性流体のその他の応用

(1) 磁性流体ダンパ

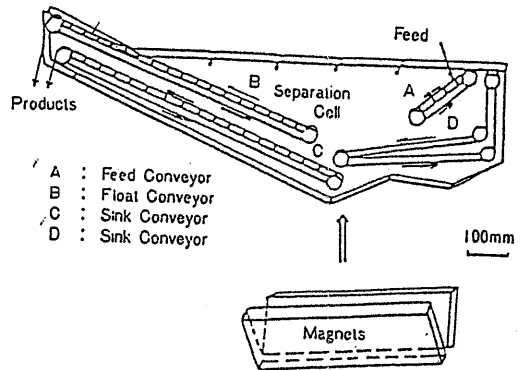
磁性流体の保持、圧力分布、粘性が磁場の作用によって制御可能であると言う性質を利用したもので、リニアダンパ、回転粘性ダンパ、ダッシュポット形ダンパなどが研究開発されている<sup>105)</sup>。



a) 装置の原理<sup>110)</sup>



b) 重力式<sup>122)</sup>



c) コンベア式<sup>122)</sup>

Fig.6.4.7 磁性流体比重差選別装置の原理とその例

Fig.6.4.8は磁性流体ダンパのステップモータへの応用例、Fig.6.4.9はスピーカのボイスコイルの共振を抑える粘性ダンパの例を示す。後者では磁性流体はダンパとしての役割のほか、コイルの発熱に対する冷却効果による瞬間的出力の増大やコイルが中心位置からずれるのを防ぐことによるダイヤフラムの安定性向上などの役割を果たしている<sup>110)</sup>。

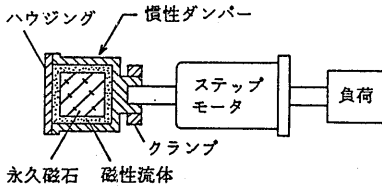


Fig.6.4.8 ステップモータへの応用例<sup>110)</sup>

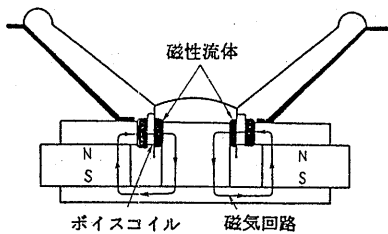


Fig.6.4.9 スピーカのボイスコイルへの応用例<sup>110)</sup>

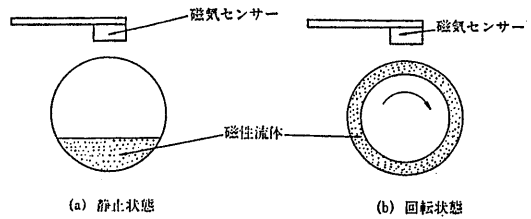


Fig.6.4.10 磁性流体遠心力スイッチの原理<sup>95),125)</sup>

b) 傾斜センサ<sup>95)</sup> Fig.6.4.11のように磁性流体を入れたU字管の一方に一次側コイルと二次側コイルを持つ作動トランスを設けてある。台が水平な位置から傾くと磁性流体の液面の位置も変わる。このために相互インダクタンスが変化し、二次側コイルに発生する電圧も変わるので、逆に、二次側コイルの電圧を測って傾斜を知ることが出来る。

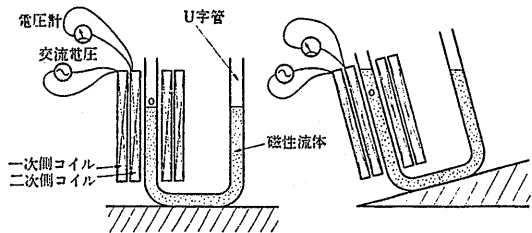


Fig.6.4.11 磁性流体傾斜センサの原理<sup>95)</sup>

(2) 磁性流体アクチュエータ<sup>105)</sup>

磁性流体の運動を介して電気・磁気エネルギーから機械の運動エネルギーへのエネルギー変換を行うものである。作動原理によって大別すると、

- 1) 磁性流体界面の変形運動を利用するもの、
- 2) 磁性流体プラグの往復運動を利用するもの、
- 3) 磁性流体中の非磁性体の運動を利用するもの、

となる。これらの原理を利用したアクチュエータは多数開発されているが、実用化は今後の研究課題である。

(3) 磁性流体センサ

a) 遠心力スイッチ<sup>95),125)</sup> Fig.6.4.10のように回転円筒容器の中に磁性流体が入っており、容器が静止している間は図のように磁性流体は底に溜まっている。磁場の検知には永久磁石とホール素子を振りつけたセンサによるものとリレー式スイッチによるものがある。円筒容器が回転しているか否かを電気回路のオンオフで検知し、逆に円筒容器が回転しているか否かで電気回路のスイッチをオンオフできる。

c) 加速度センサ<sup>95),125)</sup> Fig.6.4.12のように作動トランスを形成する一次側コイルと二次側コイルを巻いた円筒容器の中に磁性流体が入っている。加速度のかかっていない状態（静止状態または一定速度で動いている状態）では磁性流体の液面は水平に保たれている。図のように横方向に加速度 $\alpha$ が働くと磁性流体の液面は角度 $\theta$ だけ傾く。加速度が加わると容器内の磁

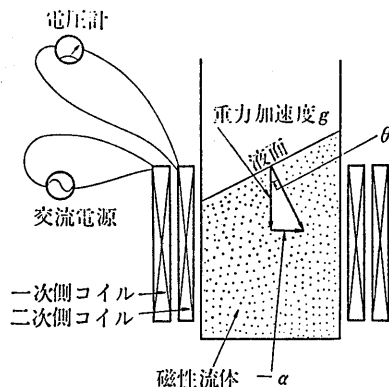


Fig.6.4.12 磁性流体加速度センサの原理<sup>95),125)</sup>

性流体の形が変わるので相互インダクタンスが変わり、二次側コイルに発生する電圧も変わる。逆に、電圧を測って加速度を知ることが出来る。

d) 回転速度センサ<sup>95),125)</sup> Fig.6.4.13のように磁性流体を入れた回転する円筒容器中の液面は遠心力のために図の様な回転放物面になる。このため相互インダクタンスが変わり、二次側コイルの電圧も変わるののでこれより回転数を測る事が出来る。

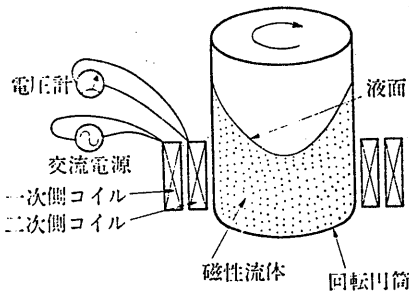
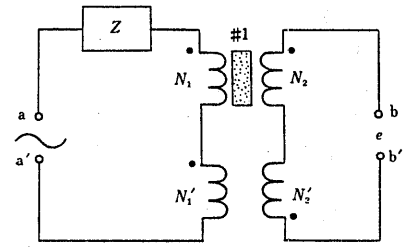


Fig.6.4.13 磁性流体回転速度センサの原理<sup>95),125)</sup>

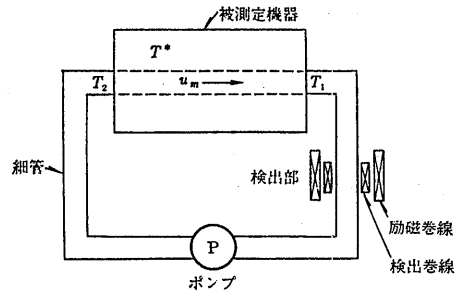
e) 磁界センサ<sup>95)</sup> 透過光強度は印加磁場強度の単調増加関数となるので未知の磁場が加えられているときに透過光強度を測定することによりその磁場の大きさを知る事が出来る。

f) 温度センサ<sup>132)</sup> 感温磁性流体は温度によりその磁束密度が変わるので、被測定物に一定容積の磁性流体を塗布し、この磁束密度の値を測定素子で計測すれば、その物体の温度を磁束値を媒介として計測できる。これを塗布法による温度計測と言う。Fig.6.4.14(a)に塗布法による温度計測の基本回路構成を示す。図において、#1は塗布した磁性流体であり、 $N_1$ は励磁用コイル、 $N_2$ は計測用コイルである。 $N_1'$ 、 $N_2'$ は誤差調整用空芯コイルである。

回転部、可動部を有する大きな機械の内部の温度を計測したい場合、複雑な機構のために表面から直接接触出来ない部位の温度を計測したい場合には、機器内部に狭い流路を設けて、感温磁性流体を強制循環させ、外部よりその磁性流体の磁束値を連続測定すれば必要部位の温度が計測できる。これを循環法による温度計測と言う。Fig.6.4.14(b)に循環法による温度計測の基本構成を示す。図に示すように、被測定機器内部と励磁及び検出巻線よりなる温度計測部との間に、感温磁性流体を小型ポンプにより強制循環させることにより、内部の温度計測が出来る。



a) 塗布法



b) 循環法

Fig.6.4.14 感温磁性流体による温度計測の基本構成<sup>124)</sup>

#### (4) 磁性流体研磨

最近、切削、研削やラッピング等では加工が困難な複雑な曲面や難加工材の高精度・高能率加工が求められている。このような新しいニーズに答える新しい加工法として、磁性流体中の磁気浮揚力を用いた磁性流体研磨法がある。これを磁性流体磁気浮揚研磨法<sup>126)-129)</sup>という。この方法はFig.6.4.15のように磁性

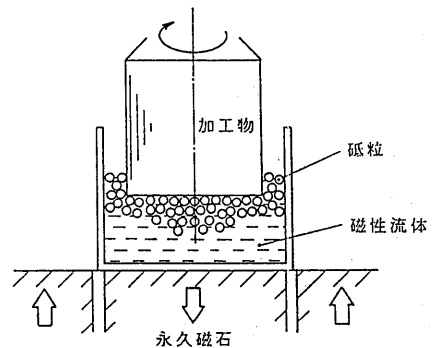


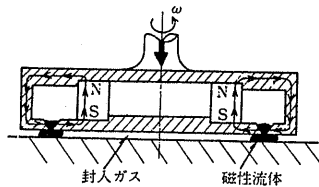
Fig.6.4.15 磁性流体磁気浮揚研磨法の原理<sup>110)</sup>

流体と砥粒（非磁性体）を入れた容器を磁石の上に置いた場合、砥粒は上方に磁気浮揚力を受ける。磁場を制御すれば砥粒を研磨に最適な位置に集めることが出来る。浮揚した砥粒を用いて研磨する複雑な形状の研磨面に対して任意に制御できる加工圧力を与えることが出来る。

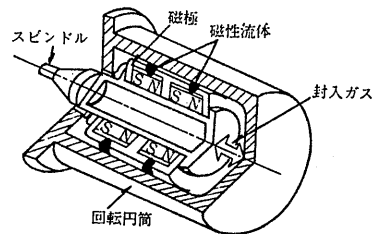
この他に、磁性流体中に砥粒を懸濁させ、その砥粒の動きを磁場により制御して研磨する砥粒懸濁加工法、電磁石によって磁性流体に磁気力を作用させ、回転ゴム板（この上に水に砥粒を懸濁した研磨剤を供給する）を膨らませて加工圧を与えて研磨する磁性流体封止加工法、穿孔したポリウレタンシートの穴の中に磁性流体と砥粒をいれておき、それに働く浮力を利用して砥粒をポリウレタンシート上にだし、これと接した加工物を研磨する作用砥粒制御研磨法がある<sup>105)</sup>。

#### (5) インクジェットプリンタ<sup>105)</sup>

磁性流体をインクに混ぜ、ノズルより高速で噴射さ



a) ジャーナル軸受



b) スラスト軸受

Fig.6.4.16 磁性流体軸受<sup>130)</sup>

#### (7) 流れの制御<sup>131)</sup>

パイプラインのベンド部や管断面積の変化する管壁などの流れの剝離し易いところに磁性流体をコーティングし、不均一磁場をかけて流れの剝離を制御しようという研究がある。

#### (8) 磁性流体による流出油回収<sup>132)</sup>

最近、大型タンカー事故がしばしばおきている。そして、海を汚染するばかりでなく、魚介類に大きな被害を与えている。磁気を利用して海面に浮いた重油などの油を除去することが実験されている。そして、磁性流体を海面に浮いた油の表面に撒布し、磁力で油を回収する試みがおこなわれている。

#### (9) 検知用メモリ<sup>124)</sup>

微細な粉末にした数種の感温磁性材料のキュリ温度を固定メモリとして利用し、その混合粉末をタンカーの積荷に混入し、漏油の検出や指定海域における廃油

せ、そのジェット方向を磁場によって制御し、紙面に印字する高速インクジェットプリンタが研究開発されている。最近、インクによる目づまりを起こし易いノズルを使用せずに、磁場により磁性流体界面を隆起させ、高電圧下でのクーロン力を利用してジェットを誘導する新しい方式のインクジェットプリンタが開発されている。

#### (6) 磁性流体軸受<sup>96),105),130)</sup>

磁性流体中に固体を安定に浮遊させる磁気作用、潤滑作用は軸受に利用できる。紡績機械の高速、軽荷重スピンドル軸受用として、直径2cmの円筒形軸受が試作された。回転数10,000rpmまで、磁性流体軸受は玉軸受を使用した場合に比較して騒音が少なく、始動トルクはほぼ同一であった。Fig.6.4.16に磁性流体軸受の例を示す。

の不法投棄等の監視に利用しようという提案がある。提案の一例として、用いる感温フェライトの粒子直径25nm程度、キュリ温度が10℃間隔の11種の感温フェライト粉末を組み合わせ、約2000種の識別コードを作成し、このフェライト粒子の混合物を10ppm程度の希薄濃度でタンカーの積荷油の中に添加混入しておけば、漏出した油はどの船の積荷であるかを識別できる。わが国においても海上における廃油の不法投棄の監視の目的で実験が行われ、可能であることが確かめられている。Fig.6.4.17に感温フェライト粉末を用いたタンカーの漏油不法投棄監視システムと検出回路図を示す。

#### (10) 磁性流体を用いた純流体素子<sup>133)</sup>

作動流体として磁性流体を用い、電磁石で噴流を制御する電磁制御式層流形比例増幅素子が考えられている。Fig.6.4.18に電磁制御式層流形比例増幅素子の例を示す。

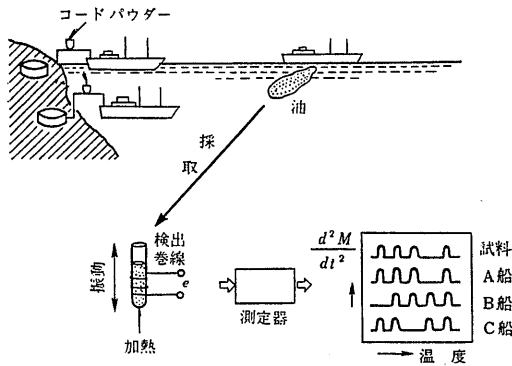


Fig.6.4.17 感温フェライト粉末を用いたタンカーの漏油検出、廃油不法投棄監視システムとパルス電圧検出回路<sup>124)</sup>

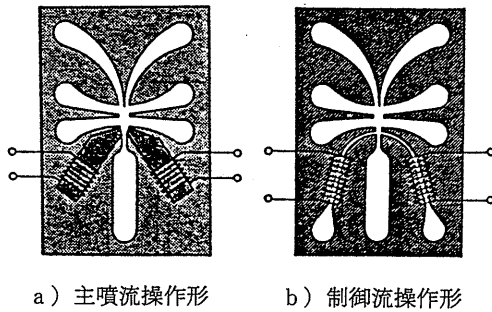
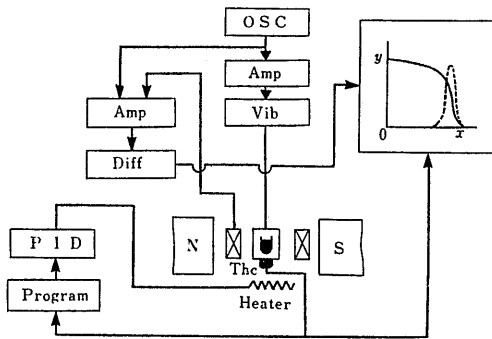


Fig.6.4.18 電磁制御式層流形比例増幅素子<sup>133)</sup>

その他の磁性流体の応用として、光シャッター、光モジュレータ、光双安定性素子、光信号増幅器、マイクロウェーブ素子への応用、触媒への応用や磁性流体を使った超音波非破壊検査法などがある。また、医療分

野への応用として制ガン剤を混入した磁性流体によるガン治療、X線の造影剤への応用などが考えられている<sup>93),95),105)</sup>。

6.4.6 まとめ

今後、磁性流体の特徴を生かした軸シール、比重差選別、ダンパ、アクチュエータ、音響、制御、センサ、電子工学や医療分野への一層の発展が期待される。更に、磁性流体の優れた特性を生かしてますます多用途への応用が考えられている。しかし、磁性流体の歴史は浅く、また磁性流体の研究が多分野にまたがっているためにその製法、性質、構造、レオロジ、流体力学は未だに良く解明されているとは言えず、その発展途上にある。

将来のこととして、安定で使い易い高温超電導物質が発見・開発されれば手軽に高磁場が得られ、磁性流体と組み合わせると更なる用途が広がるものと期待される。また、磁性流体を用いた流出油回収が可能と考えられる。

将来の研究課題：液体水素、液体ヘリウム等の極低温流体を安全に漏洩無しに移送するためのポンプ、圧縮機、その他の補機類に使用する磁性流体軸シール法の研究を進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) Phillips, O.M.: The Prospects for Magnetohydrodynamic Ship Propulsion, J. of Ship Research, Vol.5. No.4 (1962), pp.43-51
- 2) 山口一、加藤洋治：電磁推進に関する文献調査及び一考察、第9回推進性能委員会公開資料、(1986)
- 3) 北野稔、岩田章、佐治吉郎：超電導マグネットによる電磁推進の基礎理論 I、II、神戸商船大学紀要第2類、第26号、(1978)、pp.219-262
- 4) 玉眞洋：超電導電磁推進船について、第14回造船学会夏期講座「新しい造船学」、(1988)
- 5) Kodama, Y.: Computation of 3-D Incompressible Navier-Stokes Equations for Flow around a Ship Hull Using an Implicit Factored Method, Proc. of Osaka Colloquium on Ship Viscous Flow, (1985)
- 6) 児玉良明：渦粘性モデルを用いた二次元翼型まわり高レイノルズ数流れに関するナビエ-ストークス方程式の数値解法、昭和60年度 (第46回)

- 船舶技術研究所研究発表会講演集、(1985)、pp.89-93
- 7) Hinatsu, M., Kodama, Y. : Numerical Simulation of Flow Controlled by MHD Effect (2-D Laminar Flow), J. of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.201, (1986), PP.91-100
- 8) 日夏宗彦：船体周りの流場制御シミュレータへのCFDの応用、昭和61年度(第48回)船舶技術研究所研究発表会講演集、(1986)、pp.72-75
- 9) 日夏宗彦：MHD流れにおける $k-\epsilon$ 方程式とチャンネル流れの計算例、第2回NSTシンポジウム、東京大学生産技術研究所、(1987)
- 10) 日夏宗彦：電磁力による二次元翼型周りの流場制御に関する研究、船舶技術研究所報告、第24巻、第5号、(1987)、p.15-29
- 11) Hinatsu, M. :  $k-\epsilon$  Modeling of MHD Flow and Its Simulation of Channel Flow, J. of the Soc. of Naval Architects of Channel Flow, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, vol. 161, (1987), pp.34-41
- 12) Kodama, Y. : A Method to Assure Positiveness of  $k$  and  $\epsilon$  in the Computation of the  $k-\epsilon$  Turbulence Model, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol.160, (1987), pp.21-27
- 13) 日夏宗彦、児玉良明：指数表現を用いた $k-\epsilon$ 方程式による乱流場の数値シミュレーション、第5回航空機計算空気力学シンポジウム論文集、航空宇宙技術研究所特別資料 SP-8、(1987)
- 14) Kodama, Y. : Computation of High Reynolds Number Flows Past a Ship Hull Using the IAF Scheme, J. of the Soc. of Naval Architects of Japan, Vol. 161, (1987), pp.24-33
- 15) 日夏宗彦：電磁力で制御された翼型まわり乱流場の流場制御シミュレーション、日本造船学会論文集第163号、(1988)、pp.88-96
- 16) Hinatsu, M., Kodama, Y., Ukon, Y. : Study on Flow Control Using the MHD Effect, Proc. of 17th Symp. on Naval Hydrodynamics, to be published
- 17) Beam, R.M., Warming, R.F. : An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations, AIAA J., Vol.16, No.4.(1978), pp.393-402
- 18) Kodana, Y. : Computation of the Two-Dimensional Incompressible Navier-Stokes Equations for Flow Past a Circular Cylinder Using an Implicit Factored Method, Papers of Ship Research Institute Vol.22, No.4 (1985), pp.25-67
- 19) Steger, J.L. : Implicit Finite Difference Simulation of Flow about Arbitrary Two-Dimensional Geometries, AIAA J., Vol.16, No.7 (1987), pp.679-686
- 20) 北村健三、平田賢：直交強磁場下における液体金属の流動および熱伝達に関する研究(第1報、長方形管内乱流に及ぼす入口磁場形状の影響)、日本機械学会論文集(B編)、第46巻、第401号、(1980)、pp.67-75
- 21) Kitamura, K., Hirata, M. : Turbulent Heat and Momentum Transfer for Electrically Conducting Fluid Flowing in Two-Dimensional Conducting under Transverse Magnetic Field, Proc. 6th IHTC, Vol.3, M-18, (1978)
- 22) 須藤浩三、富田幸雄：垂直磁場における液体金属の流動に関する研究(第3報、遷移に及ぼす電磁場の影響)、日本機械学会論文集(B編)、第40巻、第322号、(1974)、pp.983-992
- 23) 須藤浩三、富田幸雄：垂直磁場における液体金属の流動に関する研究(第4報、乱流の管摩擦係数)、日本機械学会論文集(B編)、第40巻、第332号、(1974)、pp.993-1002
- 24) Girshick, S.L., Kruger, C.H. : Experimental Study of secondary flow in a magnetohydrodynamic Channel, J.F.M., vol.170, (1986), pp.233-252
- 25) Lykoudis, P.S., Brouillette, E.C. : Magneto-Fluid-Mechanic Channel Flow, II. Theory, Phys. Fluids, Vol.10.No.5 (1967), pp.1002-1007
- 26) Hanjalic, K. and Launder, B.E. : A Reynolds Stress Model of Turbulence and Its Application of Thin Shear Flow, J.F.M., Vol.52, part 4, (1972), pp.609-638



- 27) Yoshizawa, A. : Statistical modeling of a transport equation for the kinetic energy dissipation rate, *Phys. Fluids*, Vol.30, No.3 (1987), pp.628-631
- 28) Laufer, J. : Investigations of Turbulent Flow in a Two-Dimensional Channel, NACA Report, 1053, (1951)
- 29) 足達宏之、日夏宗彦、神蔵輝男：薄い船の抵抗成分分離の実験的研究、船舶技術研究所報告、第19巻、第1号、(昭和57年)、pp.13-48
- 30) Rodi, W. : Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review-, IAHR STATE-OF-THE-ART PAPER, (1980)
- 31) 今井功、桜井明：電磁流体力学、岩波講座現代物理学、岩波書店、(1959)
- 32) Huges, W.F., Young, F.J. : The Electromagnetodynamics of Fluids, John Wiley & Sons Inc., (1966)
- 33) White, F.M. : Viscous Fluid Flows, McGraw-Hill, (1974), p.476
- 34) Abbott, I.H., Doenhoff, A.E. : Theory of Wing Sections, Dover, (1959)
- 35) 竹野忠夫：新しい燃焼技術(1)、機械の研究、第38巻、第2号(1986)、pp.246-250
- 36) 竹野忠夫：新しい燃焼技術(2)、機械の研究、第38巻、第3号(1986)、pp.367-372
- 37) R.I.Noorani and R.E.Holmes : Effects of Electric Fields on the Blowoff Limits of a Methane-Air Flame, *AIAA Journal*, Vol.23, No.9(1985), pp.1452-1454
- 38) R.I.Noorani and R.E.Holmes : Effects of Electric Fields on the Flame Propagation Velocity of Methane-Air Flame, *AIAA Journal*, Vol.24, No.1 (1986), pp.190-192
- 39) C.Berman, R.J.Gill, D.G.Keil and H.F.Calcote : Enhanced Soot Radiation using Electric Fields, PB-88-101811, (1987)
- 40) 田中秀憲、齊間厚：電界中の火炎の振舞い、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.289-291
- 41) 河野通方：拡散火炎のすす粒子に及ぼす電界の影響、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.68-81
- 42) 謝林、田村健次、杉山元、河野通方、畔野昭彦、染谷常雄：拡散火炎のすす生成に及ぼす高周波電界の影響、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.179-181
- 43) 定方正毅、原野安土、佐藤正之、佐賀井武：コロナ放電プラズマに於けるOHラジカルによるすすの酸化、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.67-69
- 44) 定方正毅：すす粒子の成長およびOHラジカルによる酸化の機構、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.10-18
- 45) E.R.Place and F.J.Weinberg : The Nucleation of Flame Carbon by Ions and the Effect of Electric Fields, 11th International Symposium on Combustion, (1967), pp.245-255
- 46) F.J.Weinberg : Electrical Aspects of Aerosol Formation and Control, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.307, (1968), pp.195-208
- 47) P.J.Mayo and F.J.Weinberg : On the Size, Charge and Number-Rate of Formation of Carbon Particles in Flames Subjected to Electric Fields, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.319, (1970), pp.351-371
- 48) R.T.Ball and J.B.Howard : Electric Charge of Carbon Particles in Flames, 13th International Symposium on Combustion, (1971), pp.353-362
- 49) S.K.Dayal and T.P.Pandya : Aerodynamic Structure of Counterflow Diffusion Flames with and without Electric Fields, *Indian Journal of Technology*, Vol.18, No.1 (1980), pp.17-24
- 50) M.Kono, K.Iinuma and S.Kumagai : The Effect of DC to 10MHz Electric Field on Flame Luminosity and Carbon Formation, 18th International Symposium on Combustion, (1981), pp.1167-1174
- 51) H.Tsuji : Counterflow Diffusion Flames, Progress on Energy and Combustion Science, Vol.8, (1982), pp.93-119

- 52) 浅川勇吉：電場による燃焼・蒸発・伝熱系の促進に関する考察（第2報）、第10回日本伝熱シンポジウム、(1973)、pp.285-291
- 53) 矢部彰：電場を利用した伝熱技術、日本機械学会、第600回講習会“先端技術と熱的制御”、(1985)、pp.15-29
- 54) N.Kaji, Y.H.Mori, Y.Tochitani and K. Komotori: Electrohydrodynamic Augmentation of Direct-contact Heat Transfer to Drops Passing through an Immiscible Dielectric Liquid; Effect of Field-Induced Shuttle Migration between Parallel Plane Electrodes of Drops, 7th International Heat Transfer Conference, Vol.5, (1982), pp.231 - 236
- 55) 浅川勇吉：アサカワ効果応用の小型ボイラの試験成績、エネルギー・資源研究会、第1回研究発表会講演文集、(1982)、pp.127-130
- 56) 土方邦夫、長崎孝夫、大矢浩史：電場による触媒燃焼の促進、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.295-297
- 57) 西田利雄、武石康夫、豊永肇：電場の火炎の流れに及ぼす影響、第25回燃焼シンポジウム、(1987)、pp.292-294
- 58) 菊地健太郎：EHD熱交換技術とその応用、機械の研究、第37巻、第12号(1985)、pp.1307-1313
- 59) 甲藤好郎、佐藤俊、西川兼康、水科篤郎、森康夫：伝熱学特論、養賢堂、(1984)、pp.248-257
- 60) 神沢淳：プラズマ流体工学とその応用、機械の研究、第39巻、第6号(1987)、pp.659-664
- 61) A.J.Harrison and F.J.Weinberg, Flame Stabilization by Plasma Jets, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.321, (1971), pp.95-103
- 62) I.Kimura and M.Imajo: An Experimental Investigation of an Arc-Heated Stirred Reactor, 16th International Symposium on Combustion, (1976), pp.809-815
- 63) 木村逸郎：乱流拡散燃焼過程に及ぼすプラズマジェットの効果、文部省科学研究費補助金重点領域研究“燃焼機構”総括班、シンポジウム“燃焼機構の解明と制御”、資料集、乱流拡散燃焼への新しいアプローチ、(1989)、pp.57-67
- 64) L.Tozzi and E.K.Dabora: Plasma Jet Ignition in a Lean-Burn CFR engine, 19th International Symposium on Combustion, (1982), pp.1467-1474
- 65) 吉田幸司、沖西覚、李冠東、斉間厚：プラズマジェットによる定容容器内の可燃混合気の着火に関する研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.212-214
- 66) J.E.Orrin, I.M.Vince and F.J.Weinberg: A Study of Plasma Jet Ignition Mechanisms, 18th International Symposium on Combustion, (1981), pp.1755-1765
- 67) F.B.Carleton, I.M.Vince and F.J.Weinberg: Energy and Radical Losses from Plasma Jet Igniters to Solid Surfaces, 19th International Symposium on Combustion, (1982), pp.1523-1531
- 68) 中山良男、那賀川一郎、木村逸郎：プラズマジェットによる燃焼促進機構の研究、第20回燃焼シンポジウム、(1982)、pp.250-252
- 69) 中山良男、木村逸郎、神藤正樹：放電による燃焼反応促進機構に関する研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.64-66
- 70) 村瀬英一、小野信輔、花田邦彦、仲原彰治、園田精一：プラズマジェット点火に及ぼす混合気初期圧力の研究、第26回燃焼シンポジウム、(1988)、pp.317-319
- 71) 相山義道：MHD（電磁流体）発電研究開発の動向、電気学会誌、第103巻、第12号(1983)、pp.1209-1216
- 72) 池田茂：MHD発電技術—研究開発の現状—、機械の研究、第35巻、第12号(1983)、pp.1331-1336
- 73) 粥川尚之、山崎初男：オープンサイクルMHD発電機の性能—新磁界配位による性能改善—、日本機械学会誌、第88巻、第802号(1985)、pp.1023-1028
- 74) 伏見康司編：実験物理学講座第30巻、プラズマ・核融合、共立出版(1979)
- 75) 林久治、中村敦子、長倉三郎：火炎中のOHラジカルの発光強度の外部磁場効果、第20回燃焼シンポジウム、(1982)、pp.28-30
- 76) 若山信子、林久治、小笠原一郎、福田健三：火炎中の活性種の発光強度の磁場効果、第22回燃焼シンポジウム、(1984)、pp.79-81

- 77) 若山信子、野副尚一、小笠原一郎、福田健三：燃焼反応の磁場効果と微量リンの検出、第23回燃焼シンポジウム、(1985)、pp.412-414
- 78) 上野照剛、江崎浩、原田耕介：磁場と燃焼反応、日本電子通信学会、技術研究報告、第85巻、第306号(1986)、pp.1-8
- 79) 上野照剛、江崎浩、原田耕助：触媒燃焼に及ぼす磁界の効果、電気学会、マグネティックス研究会資料、Mag-86、No.10-24(1986)、pp.9-27
- 80) 上野照剛、原田耕助：触媒による燃焼とガス流の制御について、日本応用磁気学会誌、第11巻、第2号(1987)、pp.445-448
- 81) S.Ueno and K.Harada : Effects of Magnetic Fields on Flames and Gas Flow, IEEE Transactions of Magnetics, Vol.25, No.5, Part 1 (1987), pp.2752-2754
- 82) 吉村克郎：燃料燃焼に利用した磁界処理装置の効果、燃料及び燃焼、第49巻、第3号(1982)、PP.241-254
- 83) D.Z.Chen, X.S.Han and L.Q.Jia : Influence of Electro-Magnetic Field on Flame Structure and Combustion Characteristic of Hydrogen and Hydrocarbon Fuels, 6th Hydrogen Energy Progress, Vol.3, (1986), pp.1045-1050
- 84) S.Sato : Measurement of Three-Dimensional Flame Temperature Fields by Holographic Interferometry and Computed Tomography, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion eds. by K.Iinuma, T.Asanuma, T.Ohsawa and J.Doi, Springer Verlag, (1987), pp.187-194
- 85) 佐藤誠四郎、熊倉孝尚：レーザー干渉法とCT法による火炎温度分布測定、日本機械学会論文集B編、第55巻、第511号(1989)、pp.841-844
- 86) S.Yamagisi : Multiple Species Concentration and Temperature Measurements in Hydrocarbon Flame by Pulsed Laser Raman, Laser Diagnostics and Modeling of Combustion eds. by K.Iinuma, T.Asanuma, T.Ohsawa and J.Doi, Springer Verlag, (1987), pp.125-132
- 87) 見目善弘、阪田総一郎：磁気分離、NEC技報、Vol.37、No.9、(1984)、pp.62-70
- 88) 玉浦裕、桂 敬：フェライト化処理法とは、用水と排水、Vol.28、No.2(1986)、pp.147-154
- 89) 武富荒、近角聡信：磁性流体（基礎と応用）、日刊工業新聞社、(1988)
- 90) 平田悦朗：磁気利用における処理技術の実際と可能性、資源テクノロジー、No.233(1986)、p p.53-57
- 91) 中山善信：磁気による水処理装置、冷凍空調技術、Vol.34、No.403(1983)、pp.120-123
- 92) J.Chowdhury, F.J.Tanzosh : Magnetic Units, Chemical Engineering, January 23, (1984), pp.22-25
- 93) 神山新一、下飯坂潤三：磁性流体とその応用、日本機械学会誌、第88巻、第799号(1985)、pp.596-602
- 94) 富田幸雄：磁性流体とその応用(1)、機械の研究、第37巻、第10号(1985)、pp.1101-1107
- 95) 武富荒、近角聡信：磁性流体—基礎と応用—、日刊工業新聞社、(1988)
- 96) R.E.Rosensweig : Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, (1985)
- 97) R.E.Rosensweig : Fluid Dynamics and Science of Magnetic Liquids, Advances in Electronics and Electron Physics, Vol.48, (1979), pp.103-199
- 98) 磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書、文部省科学研究費補助金“総合研究(B)”、(1985)
- 99) 磁性流体工学に関する総合的研究成果報告書、昭和61年度文部省科学研究費補助金“総合研究(A)”、(1987)
- 100) 磁性流体工学に関する調査研究分科会成果報告書、日本機械学会、(1986)
- 101) 日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)
- 102) 磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1987)
- 103) 磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)
- 104) Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Proceedings of the 4th International Conference on Magnetic Fluids, eds. by S. Kamiyama and J.Shimoiizaka, Vol.65, Nos.2 & 3 (1987)

- 105) 富田幸雄：磁性流体とその応用(2)、機械の研究、第37巻、第11号(1985)、pp.1249-1252
- 106) 熊谷直直、比気正：液体水素輸送船の補機に関する研究、船舶技術研究所報告、第19巻、第2号(1982)、pp.89-106
- 107) 武富 荒：磁性流体軸シールの進歩と高温超電導発電機への応用(1)、機械の研究、第40巻、第4号(1988) pp.481-486
- 108) 武富 荒：磁性流体軸シールの進歩と高温超電導発電機への応用(2)、機械の研究、第40巻、第5号(1988)、pp.587-590
- 109) 尾崎浩一：磁性流体シール、潤滑、第33巻、第12号(1988)、pp.895-899
- 110) 神山新一：磁性流体の力学と応用、日本機械学会、第627回講習会“ハイテックと流体工学”、(1986)、pp.111-122
- 111) 武富 荒：磁性流体軸シールの原理と応用(1)、機械の研究、第36巻、第1号(1984)、pp.18-22
- 112) 武富 荒：磁性流体軸シールの原理と応用(2)、機械の研究、第36巻、第2号(1984)、pp.264-268
- 113) 佐藤公男：磁性流体シールとその応用、機械の研究、第37巻、第2号(1985)、pp.253-259
- 114) 武富 荒：磁性流体シールの原理と進歩状況、日本機械学会関西支部、第160回講習会、(1988)、pp.103-114
- 115) 神山新一：磁性流体シール、潤滑、第27巻、第3号(1982)、pp.153-158
- 116) 岸田卓也、広山弘夫、古川義夫、新居勝敏：オイルミスト用磁性流体シールの開発、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.28-30
- 117) 井小萩利明：磁性流体シール特性の評価について、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.31-32
- 118) E.L.Resler, Jr. and R.E.Rosensweig : Magnetocaloric Power, AIAA Journal, Vol.2, No.8(1964), pp.1418-1422
- 119) E.L.Resler, Jr. and R.E.Rosensweig : Regenerative Thermomagnetic Power, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Vol.89, No.3 (1967), pp.399-406
- 120) H.Matsuki, K.Yamasawa and K.Murakami : Experimental Considerations on a New Automatic Cooling Device Using Temperature-Sensitive Magnetic Fluid, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-13, No.5 (1977), pp.1143-1145
- 121) 土方政行、中谷功、高橋務：磁性流体熱機関の試作とその考察、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.33-36
- 122) 加藤博明：廃棄物の物理的分別法における最近の動向、P P M、第16巻、第11号(1985)、pp.2-11
- 123) 薦岡孝則、江間俊一、佐藤敏人：抗水処理フェアライトを用いた水ベース磁性流体の特性と応用、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.49-51
- 124) 村上孝一：感温磁性流体とその応用-機械技術者のために-、機械の研究、第39巻、第7号(1987)、pp.763-769
- 125) 神崎勇二、山沢清人、石橋誠一、内藤光雄、中村浩：磁性流体による機械量の検出法、日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)、pp.22-24
- 126) 河田研治、谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法-Magnetic Float Polishing-、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1987)、pp.50-52
- 127) 加藤康司：浮子を用いた磁性流体研磨、日本機械学会誌、第92巻、第843号(1989)、pp.160
- 128) 梅原徳次、加藤康司：磁性流体研磨の研究(輝線の発生条件)、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.62-64
- 129) 山本豊寿、加藤康司、梅原徳次：磁性流体研磨の研究(砥粒の浮揚分布)、磁性流体連合講演会、磁性流体講演論文集、(1988)、pp.65-67
- 130) 神山新一：軸受・潤滑技術に対する電磁力の利用、機械の研究、第34巻、第1号(1982)、pp.201-206
- 131) R.E.Rosensweig : Magnetic Fluids, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.19, (1987), pp.437-463
- 132) 杉本光男：磁性材料の新しい応用、機械の研究、第39巻、第9号(1987)、pp.975-981

- 133) 壁井信之、土屋喜一：磁性流体を作動流体とした電磁制御式層流形比例増幅素子、日本機械学会、第943回講演会磁性流体工学講演論文集、No.860-12、(1986)、pp.25-27

## 7. 船用機関への応用

### 7.1 超電導電動機

ここでは超電導電動機と発電機の構造について述べる。原動機を含めたシステム全体については7.4節で取扱う。

超電導電動機と発電機を組み合わせた超電導電気推進システムは、たとえ液体窒素温度で使える高温超電導体の応用が可能となり、冷却効率が格段に向上したとしても、運動エネルギーを電気エネルギーに変換する際のロス(5~25%)<sup>1)</sup>のために従来のディーゼル主機直結推進システムに比較し効率が悪くなることは避けられない。しかし、SWATH(小水線面双胴船)、SES(表面効果船)などの新形式船舶では、超電導電気推進システムは機関、動力伝達系の配置の容易なこと、動力伝達効率が良いこと、また一般の商船においても機関室の重量、空間の減少によるペイロードの向上が期待できることから、総合的なエネルギー効率は現状の機関より向上する可能性が考えられる。また、将来、燃料電池など効率が良く、直接電気エネルギーの供給が可能な機関との組合せにより、現状の推進システムを大幅に越えるエネルギー効率を持つ推進システム実現の可能性も考えられる。

超電導電動機の研究開発は、おもに、米国、英国、日本で進められている。米国では、DTRC(David Taylor Reserch Center)が中心となり開発が進められ<sup>2)</sup>、1980年には、300kW、2,400RPMの超電導単極電動機および300kW、19,500RPMガスタービン駆動同発電機の開発を完了し、全長約20mのアルミ製実験船ジュピター2世号に搭載しテストを続けている。引き続き、2.25MW、1,200RPMの超電導電動機を開発、前記ジュピター2世号にて海上試験に成功したとしている。

英国では、国防省の後押しで、IRD社(International Reserch and Development Company Limited)が研究開発を進めており<sup>3),4)</sup>、1975年には1MWクラスの超電導単極電動機と同発電機の試作を完了し、19

79年から15~25MWクラスの設計、製作に着手したが、財政的理由から開発のテンポは遅いようである。

日本では、1979年より日本船舶機器開発協会と住友重機械工(株)が共同で船用超電導単極電動機の開発に着手し、1982年に50PS級超電導単極電動機を開発し、現在、650PS、420RPMの同電動機の開発を進めているところである<sup>5),6),7)</sup>。

#### 〔超電導電動機の構造と問題点〕

常電導の直流機は、N、S両性磁極でトルクを発生する異極機であるが、開発が進められている超電導機は、いずれも一定方向、一定量の磁束によりトルクを生じる単極機である(Fig.7.1.1)。単極機は、現在、発電機としては、アルミニウム精錬、粒子加速用強磁界電磁石や電磁ポンプの励磁電源など構造が簡単かつ堅固で効率の良い低電圧大電流源として利用されているが、電動機としての利用はほとんどないと思われる。超電導機の場合、単極機とせざるを得ないのは、異極機にすると電気子電流が時間的に変化するため、界磁コイルの超電導巻線に交流損失による発熱が生じ、クエンチの原因になるとともに、冷却のための損失が莫大となるのが大きな理由である。一般に4.2Kにおける1Wの発熱を冷却するためには500W~1kWの電力を必要とすると言われている。しかし、最近、低損失の交流超電導線の開発が伝えられ、異極機の開発の進展が期待される<sup>8)</sup>。

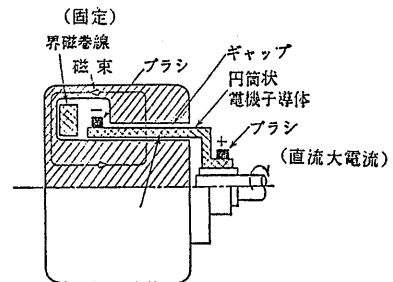
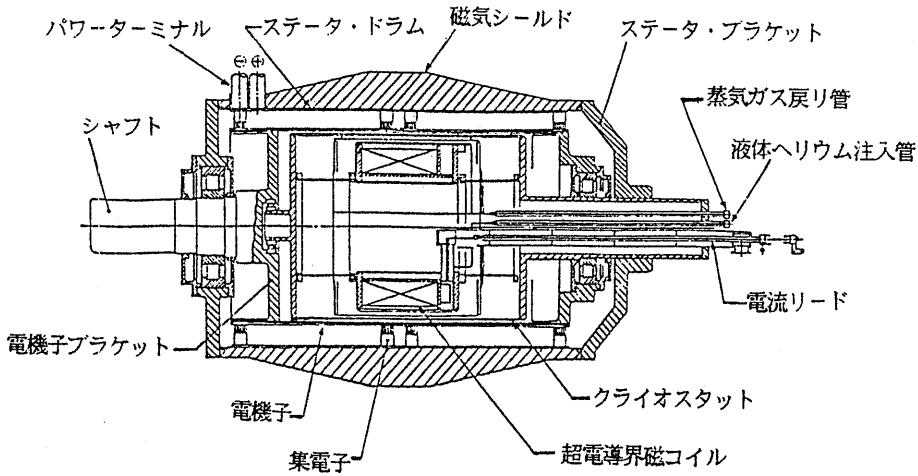
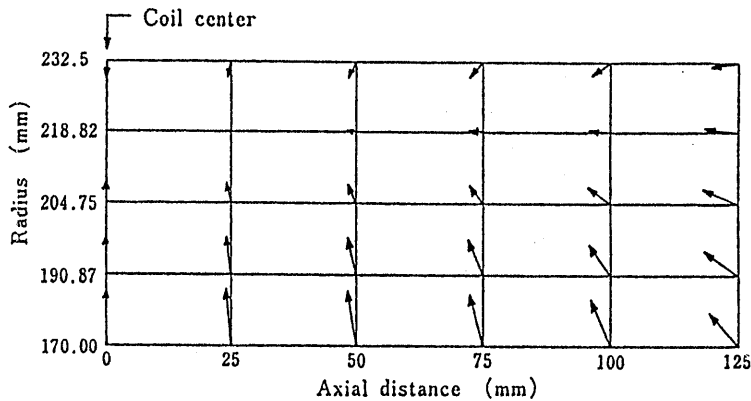


Fig.7.1.1 単極回転機

Fig.7.1.2に代表的な超電導単極電動機の構造図を示す<sup>5)</sup>。超電導巻線は界磁コイルに使用され、強磁界となるので鉄心を使用しないため、巻線に全トルクの反作用がかかり、超電導巻線が動きクエンチの原因となるため強固な機械的支持構造が必要となる。Fig.7.1.3に超電導コイルに働く電磁力分布の計算例を示

Fig.7.1.2 超電導単極電動機の構造<sup>5)</sup>Fig.7.1.3 コイル中の電磁力分布計算例<sup>5)</sup>

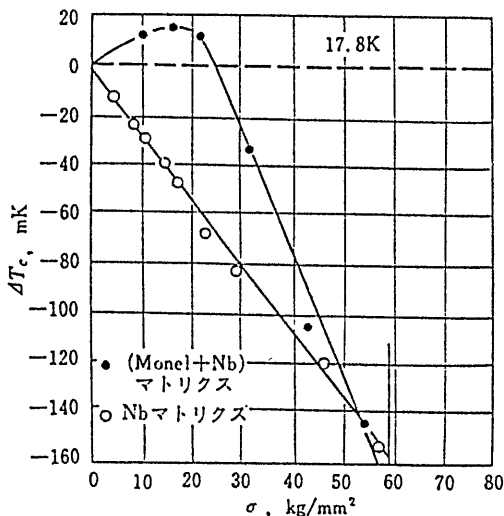
す<sup>5)</sup>。計算用コイルの諸元をTable 7.1.1に示す。巻線の半径方向の力は、コイル中心部で膨張力が最大となり、コイル最外層では圧縮力となる。巻線の軸方向には圧縮力が働き、このため巻線は軸方向に移動しようとする。

超電導巻線の機械的動きを抑えるため、コイル押さえによりコイルは軸方向に締めつけられるほか、エポキシ樹脂を含浸させながらコイルを巻き、成形後、エポキシ樹脂を硬化させる方法が用いられている。エポキシ樹脂により熱伝導率を低下させないため、巻きもどしを可能とするため、樹脂を含浸せず超電導線材に巻き張力を加えて巻く方法などもとられている。こ

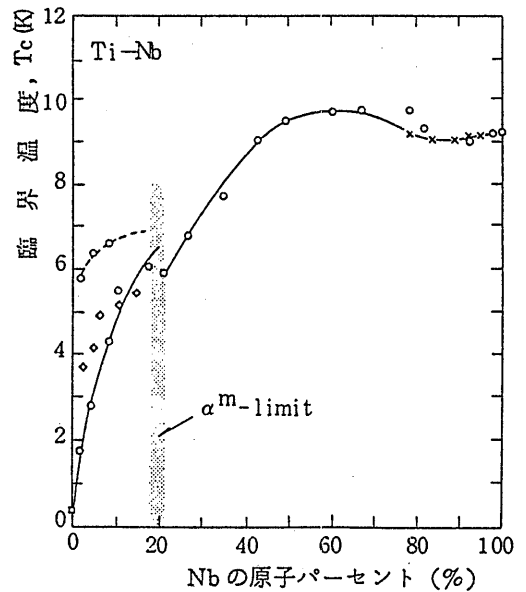
の場合、超電導線材の臨界温度 $T_c$ は応力、歪を受けると低下するため、張力の大きさをどの程度にするかが重要な問題になる。Fig.7.1.4は $Nb_3Sn$ 線材の引張応力による $T_c$ の変化を示したものである<sup>10)</sup>。 $NbTi$ については詳しい定量的データは見あたらないが、 $Nb_3Sn$ より若干変化は少ないようである。超電導線材は超電導材のフィラメントとCuなどをマトリックスとした複合構造であるため、液体ヘリウムで冷却されると、熱収縮差によりフィラメントに残留圧縮応力が働き $T_c$ が低下する。従って、図に示すように、引張応力が加わると、 $T_c$ はまず上昇し、残留歪がゼロの時最大と成ったのち低下する。

Table 7.1.1 計算用コイル諸元<sup>9)</sup>

項目		物性値
巻 枠	内半径 (mm)	170.0
	外半径 (mm)	175.0
コイル	内半径 (mm)	177.0
	外半径 (mm)	232.5
巻枠の弾性率 (Kgf/mm <sup>2</sup> ) (SUS304)		19400
コイルの弾性率 (Kgf/mm <sup>2</sup> )		1910
巻枠の熱収縮率 (%)		-0.296
コイルの熱収縮率 (%)		-0.283
巻枠のポアソン比		0.290
コイルのポアソン比		0.345
コイル通電電流 (A)		691.1

Fig. 7.1.4 引っ張り応力によるNb<sub>3</sub>Sn線材のT<sub>c</sub>の変化<sup>10)</sup>

超電導電動機では、超電導フィラメントとして、現在最も広く用いられているT<sub>c</sub>が10K前後のNbTi (Fig.7.1.5) が使用され<sup>9)</sup>、マトリックスのCuあるいはCuNiの中にフィラメントを多数本埋め込んだ極細多芯複合導体と呼ばれる構造としている。超電導コイルは、液体ヘリウムにより4.2Kに冷却される。

Fig. 7.1.5 NbTi合金のNb組成と転移温度<sup>9)</sup>

回転する電動子は、二分割のドラムタイプで、トルクチューブに接続されている。単極機であるために電動子には大電流の供給が必要である。高速で回転する電動子に最小のメカニカルロスと最小の電気的ロスで大電流の供給を可能とする集電機構の開発が最も困難な課題の一つと言われてきた。DTRC(米)では、ブラシに液体金属(NaK共晶合金)を使用し、電流密度750~1500A/cm<sup>2</sup>以上を満足している<sup>2)</sup>。NaKは常温で液体であり、集電には最も適当な性能を持っているが、空気、水と爆発的に反応するため密閉部で使用せねばならないという欠点がある。IRD(英)<sup>4)</sup>および日本<sup>7)</sup>では、金属メッキ炭素繊維ブラシを開発し、電流密度100A/cm<sup>2</sup>が可能と報告している。この他、炭素繊維強化Cu-Sn合金、ガリウム・インジウム共晶合金を用いたブラシの集電特性が報告されているが、いずれも寿命、信頼性については、未だ十分とは言えないようである。