

# 高性能交流可変速システム

## High-Performance AC Variable Speed Drive System

吉 田 信 一<sup>(1)</sup>  
Shinichi  
YOSHIDA

浦 上 順 一<sup>(2)</sup>  
Junichi  
URAGAMI

### 抄 録

高性能交流可変速システムであるサイクロコンバータ、GTO(Gate Turn Off Thyristor)インバータ及びIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)インバータの特徴とその導入について述べた。高性能交流可変速システムは、1980年代のベクトル制御の実用化に伴い導入され始め、現在では旧来の直流駆動システムに代わって適用されている。特に近年GTOインバータが開発実機化されたことにより、小容量から大容量かつ低速回転から高速回転の全範囲にわたり、高性能交流可変速システムが適用できるようになった。

### Abstract

This paper describes the characteristics of Cyclo-converter, GTO inverter and IGBT inverter which are AC variable speed drive system of a high performance, together with their introduction into devices. The high performance AC variable speed drive system started being introduced into devices in keeping with the practical use of vector controls in 1980s, and it is at present applied in place of the traditional DC drive system. Especially through the GTO inverter being developed and put to practical use, the high performance AC variable speed drive system has been able to be applied throughout the range from a small capacity to a big and a low r.p.m. operation to a high.

## 1. 緒 言

高性能交流可変速システムの確立には、その背景に電力用半導体デバイスの大容量化、高速化及び低損失化の開発と、高性能マイクロコンピュータによるベクトル制御及びPWM(Pulse Width Modulation)制御の実現がある。そしてその制御性能は高く評価され、近年建設されたCAPL(Continuous Annealing & Processing Line)及びCGL(Continuous Galvanizing Line)に導入されており、また、熱間圧延ミル及び冷間圧延ミルの老朽更新の際にも旧来の直流駆動システムに代わり導入されている。

高性能交流可変速システムを採用するメリットとしては、制御装置が高精度(速度制御精度、トルク制御精度)であることによる成果の外に、交流電動機を使用することにより以下のメリットが挙げられる。

- 1) 交流電動機は単機容量を大きくできる(省スペース)。
- 2) 整流子がないことから保守性が良く、また対環境性に優れた構造にできる。
- 3) 電流変化率(di/dt)を大きくとれるため応答性が上げられる。

従って、高性能交流可変速システムを導入することは保守性向上の外に、応答性の向上及び揃速性の向上が実現できることから、

圧延ラインであればAGC(Automatic Gauge Control)精度の向上が、またプロセスラインでは安定張力通板及びスリップ疵の防止が達成でき、歩留りの向上に大きく貢献することになる。

## 2. 交流可変速システムの適用範囲とその動向

現在高性能交流可変速システムとしては、サイクロコンバータ及びGTOインバータ並びにIGBTインバータの三種が用意されており、その適用範囲は、その負荷である電動機の回転数及び出力に対応し、おおそ図1<sup>1)</sup>の通り表される。

近年の傾向として次の事項が挙げられる。

トランジスタインバータ：

- (1) そのスイッチング用素子がパワートランジスタから低損失で高速スイッチングの可能なIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)に移行し、更に3レベル式(NPC: Neutral Point Clamped Type)の実機化により適用範囲が拡大した。

GTOインバータ：

- (2) トランジスタインバータとサイクロコンバータの中間容量対応として開発されたGTO(Gate Turn Off Thyristor)インバータが、着実に適用分野の一翼を担うようになった。

<sup>(1)</sup> 技術開発本部 設備技術センター システム制御技術部  
掛長

<sup>(2)</sup> 技術開発本部 設備技術センター システム制御技術部  
部長代理

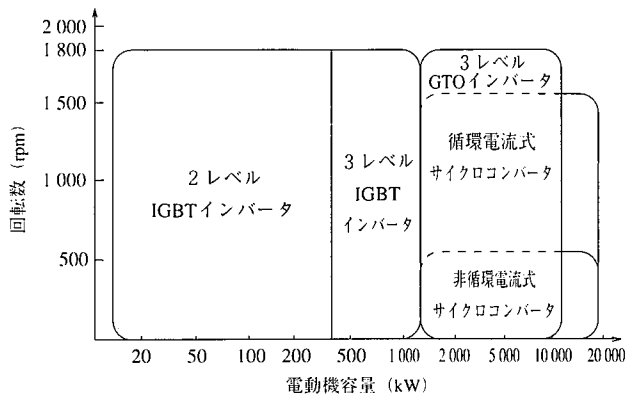


図1 交流可変速システムの適用範囲

サイクロコンバータ：

(3)電力用に開発された光トリガーサイリスタを使用することにより、更に大容量への適用が可能となった。

### 3. 各種交流可変速システムの特徴とその導入

従来より、熱間圧延(以降熱延と記す)ミル等の大容量電動機にはサイクロコンバータが、またプロセスライン等の小容量電動機にはトランジスタインバータが適用されてきた。しかしながら、冷間圧延(以降冷延と記す)ミル並びにプロセスライン主機等の中容量電動機には適正な方式がなかったため、やむなく旧来の直流駆動式もしくは高価ではあるがサイクロコンバータを適用せざるを得なかった。このような背景の中、新幹線のぞみ号に採用が決まったGTO素子を改良かつ応用したものがGTOインバータであり、現在では中大容量電動機対応として納入実績も増えてきている。

本章では、以上述べたラインドライブに適用される高性能交流可変速システムであるサイクロコンバータ、GTOインバータ、トランジスタインバータ(IGBTインバータ)の特徴と導入に関して述べる。

#### 3.1 サイクロコンバータ

##### 3.1.1 サイクロコンバータの特徴

サイクロコンバータのスイッチング素子には、他の素子に比べ熱耐量の大きなサイリスタが用いられる。サイリスタはスイッチング速度が遅い代わりに、容易に並列及び直列接続することができる特徴をもっており、それにより出力電圧及び電流容量を上げることが可能となる。このようなことから、大容量及び過負荷率の大きな負荷に容易に対応できる交流可変速システムといえる。現在光トリガーサイリスタを用いたもので、最大容量15MVAクラスまで対応が可能となっている。

サイクロコンバータには交流波形出力の方式として、循環電流式と非循環電流式がある。その二つの方式を比較したものを表1に示す。この二つの方式の大きな違いは、非循環電流式には順方向電流と逆方向電流を切り替えるためのデッドタイム(1~3ms)があるため、循環電流式に比べトルクリップルが大きく、またその制約のために最高出力周波数も低く抑えられることである。しかしながら、順方向と逆方向の変換器を同時に使うことがないため、電源変圧器を共通として切り替え使用することが可能であり、併せて配線工事量も削減できることから循環電流式に比べ安価なシステムとなる。

非循環電流式はトルクリップルが大きいため、成品品質(表面疵等)を重視するラインには採用されていなかった(表1 新日本製鐵内

適用例参照)が、海外では主流の方式で実績も多いことから今後採用する方向に進むものと考えられる。また循環電流式は、循環電流を制御することにより、無効電力補償装置を簡素化できるメリットがあることから、これらのことを勘案して方式選定される。

#### 3.1.2 サイクロコンバータの導入

サイクロコンバータはサイリスタの位相制御により遅れ力率運転となり、また高調波成分も多いため、力率改善及び高調波の対策が必要となる。これらの対策について、新日本製鐵八幡製鉄所(以降八幡と略す)No.4冷間圧延ミル(以降4CMと略す)で試算した結果、72アーム循環電流式サイクロコンバータを採用する前提で、表2<sup>2)</sup>の通りであった。

ここで、狙い力率を高い値に設定したのは、一次電源の増強を回避するためであり、電源容量に余裕がある場合は、高い値に設定する必要はない。試算結果では、既存の同期電動機を同期調相機(Synchronous Phase Modifier)として運転しても、力率改善コンデンサ及び高調波フィルタの総容量として29MVAが必要となった。また、これらの設置スペースとして150m<sup>2</sup>が見込まれた。なお表2に示す値は、電源系統のインピーダンス及び既存負荷容量等により変わる値であることから、参考値として参照されたい。

八幡4CMの場合、負荷変動が小さいため力率改善コンデンサは一定容量にできたが、熱間圧延ミル等の負荷変動の大きなラインに適用する場合は、無効電力補償装置としてSVC(Static Var Controller/Compensator)若しくはSVG(Static Var Generator)が必要となる。SVCは安価なため良く用いられるが、スイッチング素子にサイリスタを用いているため高調波を発生する。従って、この発生分も含めて高調波対策が必要となる。ちなみに、SVGはスイッチング素子にGTOを使用しており、高調波分は無視できるレベルであるが、高価であるため高速応答の要求される場合に導入されることが多い。

#### 3.2 GTOインバータ

##### 3.2.1 GTOインバータの特徴

GTOインバータは素子の口径径化等により大容量負荷への適用が可能となり、現在では10MVA以下の領域でサイクロコンバータと競合する方式となってきた。その特徴は以下の通りである。

- (1)自己消弧素子であるGTOをコンバータ(交流を直流に変換)部に採用することにより、電源力率1の運転が可能となり、その結果電源設備の利用率を高くできること。また高速スイッチングにより、より正弦波に近い波形が得られることから電源高調波も少なくできること。これらにより、力率改善及び高調波対策が不要となり電源設備費を下げられる。
- (2)高い出力周波数が得られるため、同一容量の電動機であれば高回転低トルク型となり、その結果電動機単価を下げることが可能になる。
- (3)サイクロコンバータに比べ電源変圧器構造が単純化され、現地

表2 八幡4冷延力率改善対策試算結果

項目	内容
サイクロコンバータ総負荷容量	25.8MW
狙い力率	99.5%
力率改善容量	38.5MVA
	├ 力率改善コンデンサー : 20MVA
	├ 高調波フィルター : 9MVA
	└ 同期調相機 (SM) : 9.5MVA
無効電力補償	循環電流ΔQ : 10MVA

表1 サイクロコンバータの性能と適用例

	サイクロコンバータ	
	非循環電流式サイクロコンバータ	循環電流式サイクロコンバータ
1. システム構成		
2. 最大容量/セット	・72アーム：9.4(光トリガーサイリスタ 17.5)MVA ・36アーム：4.7MVA (大容量化は素子並列接続)	・72アーム：8.26(光トリガーサイリスタ15.4)MVA ・36アーム：4.13MVA (大容量化は素子並列接続)
3. 出力電圧	・72アーム：3.3(光トリガーサイリスタ 5)kV ・36アーム：1.5～1.65kV	・72アーム：3.3(光トリガーサイリスタ5)kV ・36アーム：1.5～1.65kV
4. 出力周波数	商用入力のみ / 3	商用入力のみ / 5
5. 界磁弱め範囲	1 : 3	1 : 6
6. 応答速度：速度制御 ：トルク制御	40rad/s 600rad/s	60rad/s 800rad/s
7. トルクリップル	・72アーム IM <sup>*1</sup> ：2.0% SM <sup>*2</sup> ：2.0% ・36アーム IM <sup>*1</sup> ：2.0% SM <sup>*2</sup> ：7.5%	・72アーム IM <sup>*1</sup> ：ほぼ0% SM <sup>*2</sup> ：0.7% ・36アーム IM <sup>*1</sup> ：ほぼ0% SM <sup>*2</sup> ：0.7%
8. 変換器効率	99%	98.5%
9. 電源への影響：力率 ：高調波	・SM <sup>*2</sup> 0.65～0.85 IM <sup>*1</sup> 0.6～0.7(72アーム) 0.45～0.55(36アーム) ・ $f_H = (*6n \pm 1)f_s \pm 6mf_0$ m,n : 1,2,3,... f <sub>H</sub> ：高調波周波数, f <sub>s</sub> ：電源周波数, f <sub>0</sub> ：出力周波数, *：12パルス式は12n	・SM <sup>*2</sup> 0.6～0.75 IM <sup>*1</sup> 0.4～0.65(72アーム) 0.4～0.5(36アーム) ・ $f_H = (*6n \pm 1)f_s \pm 6mf_0$ m,n : 1,2,3,... f <sub>H</sub> ：高調波周波数, f <sub>s</sub> ：電源周波数, f <sub>0</sub> ：出力周波数, *：12パルス式は12n
10. 新日本製鐵内適用例	*名古屋粗圧延機 10 000kW *大分サイジングミル 6 100kW *大分熱延走間シャワー 2×1 480kW	*君津熱延仕上(SM駆動) 11 250kW *大分熱延仕上(SM駆動：光トリガーサイリスタ) 12 000kW *八幡新冷延(IM駆動) 7 400kW *広畑1冷延(IM駆動) 4 500kW *光4冷延 5 000kW
11. 電気工事量	・循環式より少ないが配線工事量多い ・変圧器現地組立て・試験	・配線工事量最多(変圧器～サイクロコンバータ間) ・変圧器現地組立て・試験
12. 付帯設備	(名古屋22kV給電の例) ・無効電力補償装置, 高調波フィルター必要	・(電源により)高調波フィルター, 無効電力補償 必要(静止形コンデンサー+循環電流制御)

\*1IM：かご形誘導電動機, \*2SM：同期電動機

組み立て作業が不要であり、かつ変圧器と変換器間のケーブル配線が簡素化される。

GTOインバータには以上のような利点があるものの、GTO素子特有のスイッチングロス及びスナバロスによる発熱を抑えるための純水冷却装置等の付帯設備が必要である。GTOインバータの変換器効率はコンバータ部を含め約96%であり、GTO素子に代わる低損失型素子の開発が望まれるゆえである。このロスは無負荷状態でも発生するため、GTOインバータはどちらかといえば高速連続運転ラインに適した交流可変速システムといえる。従って間欠負荷に適用する場合は、無負荷時の制御方を工夫する(スイッチング周波数を

下げる、若しくははスイッチングをOffとする)ことが望まれる。

GTOインバータの性能及び適用例を表3に、後述のIGBTインバータと併せて示す。

### 3.2.2 GTOインバータの導入

GTOインバータの適用拡大の起点となった八幡4CMへの導入について述べる。当初八幡4CMは72アーム循環電流式サイクロコンバータを導入することで計画を進めたが、GTOインバータが電動機容量と適合したこと、また給電能力に制限のある4CMとして力率1運転が魅力であったこと、更に将来の薄物高速通板に最適な方式であると判断されたこと等から、GTOインバータの導入に踏み切った。

表3 3レベル (NPC) インバータの性能と適用例

	3レベル (NPC) インバータ	
	GTOインバータ	IGBTインバータ
1. システム構成	<p>直流電流 GTOコンバータ GTOインバータ</p>	<p>直流電流 コンバータ IGBTインバータ (サイリスタまたはIGBT)</p>
2. 最大容量/セット	4 000kVAまたは10 000kVA (大容量化は装置並列接続)	1 500kVA (大容量化は装置並列接続)
3. 出力電圧	4 000kVA : 2 400V 10 000kVA : 3 300V	840V
4. 出力周波数	60Hz	60Hz
5. 界磁弱め範囲	1 : 6	1 : 6
6. 応答速度：速度制御 ：トルク制御	80rad/s 1 000rad/s	80rad/s 1 000rad/s
7. トルクリップル	0.5%以下	0.5%以下
8. 変換器効率	・インバータ0.98, コンバータ/インバータ組合せ0.96 但し無負荷時も損失不変	・インバータ0.98以上 但し無負荷時も損失不変
9. 電源への影響：力率 ：高調波	・GTOコンバータ採用でほぼ1.0運転可 ・一般に対策不要。但し高次高調波が多いので 通信障害要注意	・小容量であり、一般にサイリスタコンバータを採用し直流電動機並 ・一般に対策不要
10. 新日本製鐵内適用例	* 八幡4冷延 (IM駆動) 5 700kW * 釜石高速ミル 1 300kW	* 八幡条鋼V4ミル 2 000kW
11. 電気工事量	・配線工事量は少ない。但し純水用ステンレス 配管工事が必要	・配線工事量は少ない。
12. 付帯設備	・変換器冷却用純水循環装置 ・(必要により) 工業水冷却・送水ポンプ ・電源により、高次高調波対策	・特になし (サイリスタコンバータ使用では電源品質は 直流並, 風冷)

\* IM：かご形誘導電動機

導入に際しては、トルクリップルが最大0.5%(表3参照)と大きい値であることから、成品表面疵への影響が懸念されたが、この影響に関し、新日本製鐵君津製鐵所(以降君津と略す)2CM及び八幡4CM並びに新冷延(以降NCMと略す)で実機調査の結果、問題のないことが判明した。このことによりGTOインバータ方式での不安要素は払拭され、八幡4CMへの導入が可能となった。

調査の結果、トルクリップルが0.5%という値が成品に影響のないレベルであることが判明したが、八幡4CMにGTOインバータを導入後、実際に測定すると0.2%レベルの低い値<sup>3)</sup>であった。また電源高調波については元々対策不要の方式ではあるが、複数負荷(1~6スタンド、TR)であったことから、各々の電源変圧器の位相を12相等価に組み合わせ、低次高調波の発生量を抑えた。

八幡4CMにGTOインバータを導入した結果、板厚精度は従来の直流駆動方式に比べ表4の通り改善<sup>3)</sup>された。(板厚精度改善には、同時に実行した板厚計サンプリング回路の改造効果も含まれる。)

### 3.3 IGBTインバータ

#### 3.3.1 IGBTインバータの特徴

当初インバータ素子としてはサイリスタが用いられていたが、安価なパワートランジスタ(バイポーラトランジスタ)が実用化される

ことによって低容量電動機の交流化が促進されてきた。近年建設されたCAPL、CGLにはこの方式が導入されている。また現在では、その素子に電圧形で低ロスのIGBTを用いることにより、変換器効率の改善がなされている。本来トランジスタインバータは低容量電動機に対応したものであったが、素子の大容量化及び3レベル式の実機化により条鋼ミルクラスへの対応も可能となってきた。(表3新日本製鐵内適用例参照)

表5に代表的なIGBTインバータの性能を示す。ここでコンバータ部にはサイリスタ若しくはIGBTが用いられるが、プロセスライン等の低容量負荷の場合力率1運転の利点がほとんどないことから、一般にサイリスタを用いた共通電源とすることが多い。IGBTは高速スイッチングの可能な素子であることから、インバータのキャリア周波数も1.5~3KHzの高い値で運転できるため、出力電流波形も正弦波に近く、従ってトルクリップルも少ない理想に近い駆動システムが実現できる。(実際には、スイッチングロス等を考慮してキャリア周波数が決められる。)

#### 3.3.2 IGBTインバータの導入

IGBTインバータは導入実績も多く性能上も問題ないので、ここでは、八幡No.1連続焼鈍ライン(以降CAL: Continuous Annealing

表4 板厚精度改善効果

	定常部	加減速部
旧DCモータ ( $\omega_c \approx 6\text{rad/s}$ )	ベース	ベース
新ACモータ+PC機能強化	$\Delta 50\%$ 改善/ベース	$\Delta 80\%$ 改善/ベース

PC: Programmable Logic controller

表5 IGBTインバータ性能一覧 (代表例)

使用素子(コンバータ/インバータ)		サイリスタ/IGBT(2レベル)
定格出力		~400kVA(ダブル800kVA)
入力	コンバータ入力電圧	AC600V
	許容変動(電圧/周波数)	$\pm 10\% / \pm 5\%$
	共通電源方式	サイリスタ逆並列方式
出力	コンバータ駆動方式	直流出力電圧一定制御(DC600V)
	出力電圧	AC420V
	最高周波数	90Hz
インバータ制御	過負荷	150% $\times$ 60s
	変調方式	PWM <sup>1)</sup>
	制御方式	・速度制御, トルク制御, ドループ付速度制御 ・自動界磁弱め付速度制御(オプション/センサレス)
制御性能	スイッチング(インバータ)	周波数 1.5kHz 同期/非同期 非同期
	速度制御精度	$\pm 0.01\%$ (センサレス $\pm 0.5\%$ )
制御性能	速度制御範囲	0.5~100% (センサレス2~100%)
	速度制御応答	$\omega_c = 60\text{rad/s}$ (センサレス20rad/s)
	トルク制御精度(直線性)	$\pm 5\%$
	トルク制御範囲	1:10
再生方式	界磁弱め範囲	1:3(オプション1:5)
	再生方式	電源回生方式

<sup>1)</sup> Pulse Width Modulation

CALへの導入を決断するに際し必ずしも自信があったわけではないが、通常ヘルパ駆動制御には垂下特性(Drooping Characteristic)を持たせることから、ある程度速度誤差は許容されるものと判断し導入に挑戦した。ただし、電動機は検出器が取り付け可能な構造としてこれに臨んだ。図2に八幡No.1CALのライン構成を示す。ライン駆動制御は3BR(ブライドルロール)後方のTD(張力設定機)が張力制御を、更に後方の4BRが速度制御を担っている。TDと4BRの間に位置する加熱帯、均熱帯、徐冷帯及び急冷帯には、3.7kW~11kWの電動機が45台設置されヘルパ駆動されている。更新の際、これ等45台をすべてセンサレス方式とした。

調整に際しては、ロール周速と速度推定値に大きな誤差のないことを確認し、また通板テストに際しては、ロール及びストリップの疵入りを配慮し、ドループ5%の比較的大きな値から調整に臨んだ。立上げ後、検査ラインにおいて、1CAL通板材の疵の検査を実施したが、従来と同等以上の良い結果が得られた。センサレス方式は1CALで導入実績ができたことから、今後CAPLその他のラインにも適用拡大されるものと考えられる。

#### 4. 結 言

高性能交流可変速システムであるサイクロコンバータ、GTOインバータ及びIGBTインバータの特徴とその導入について述べた。大容量電動機対応のGTOインバータとサイクロコンバータは、その適用範囲も重複してきており、駆動システム選定の際は各々の特徴を勘案して選定されねばならない。その大きな要点としては、サイクロコンバータの電源品質対策とGTOインバータの変換器ロスと冷却付帯設備であるが、これらは導入先の電源事情及び用水条件等を含

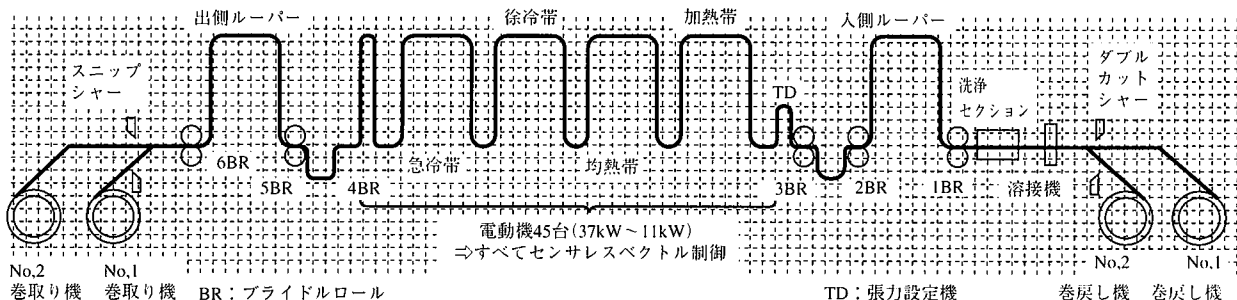


図2 八幡No.1CALライン構成

Lineと略す)の老朽更新でセンサレスベクトル制御方式(以降センサレス方式と略す)を導入したので、このことを中心に述べる。

CALで使用される電動機はその容量が小さく、すべてがIGBTインバータの適用範囲であった。更新するに際しては低コスト(機器費及びに工事削減)を重点指向し、ヘルパ群を対象としてセンサレス方式を導入することとした。センサレス方式は、プロセスラインのように電動機容量が小さく、かつ多数設置されている場合に導入メリットが大きい方式である。CALのように炉のあるプロセスラインは、ヒートバックル及びウォーク(トラッキング)並びに成品疵の発生を防止するために、その駆動システムには高いトルク制御精度及び速度制御精度が要求される。しかしながらセンサレス方式は、センサ付きに比べ速度精度、トルク精度ともに劣っている(表5参照)ため、その導入実績は疵入りの心配のない例えばカーボンロールを使用する電磁鋼板ライン等に限られていた。

め総合的に評価する必要がある。またIGBTインバータについてはセンサレス方式の導入について述べたが、この方式はコストメリットのみでなく、システムの信頼性向上にもつながることから、今後プロセスラインでの適用拡大が進むものと確信する。

現在、高性能交流可変速システムの付帯制御機能として軸ねじり振動抑制等の高級機能も準備されているが、今後は調整及び保守の簡素化のため、オートチューニング機能の充実並びに故障解析システムの開発が望まれる。

#### 参考文献

- 三菱電機カタログMELVEC-1200
- 羽片 ほか: 圧延主機交流可変速ドライブシステムの最適適用検討, 平成4年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, 1992.8, p.148
- 寺崎 ほか: 八幡4冷延へのGTOインバータ適用技術, 電気学会研究会資料, 金属産業研究会, 1995.7.27