

Fig. 2 Relation between transmitting coefficient and width of gap (Size of transcore : outside \times inside \times thickness = $18 \times 10 \times 16$ mm).

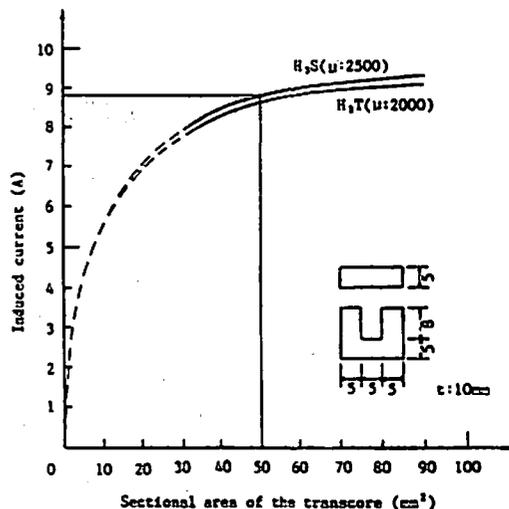


Fig. 3 Relation between sectional area of the transcore and induced current (Lead wire length : 20m, Connecting wire length : 1.8m, Number of the transcores : 1, Number of detonators : 1)

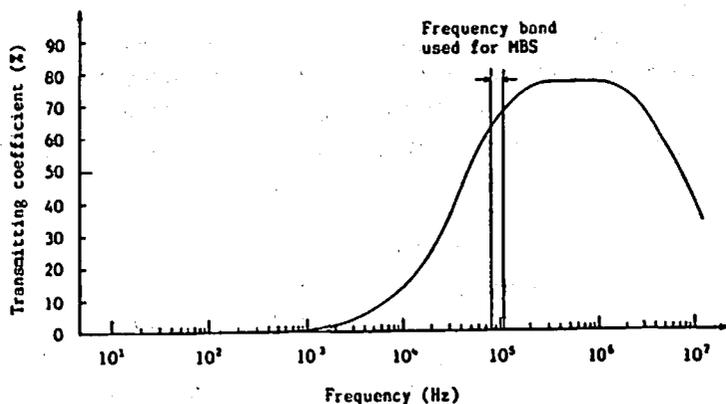


Fig. 4 Frequency character of the transcore.

導電率は、わずか1.0mmのギャップでさえ、ギャップ無しのコアに比べ14%しかなく、ギャップによる損失は非常に大きい。また、コアを大型化し10倍近い断面積にしても、34%前後の誘導電流しか得られない。

そこで、コアを分離し、母線および脚線を通した後、再び密着させる分離密着型のコアについて試験を行ったところ、約80%の誘導電流が得られた。この結果から分離密着型について検討した。

また、コアの形状に関しては、結線時の作業性とコアを収納するハウジングの形状を考慮して、Fig. 3に示すようなU型とI型の組合せとすることとし、

また、材質は、種々の特性のものについて検討し、伝達効率に優れたT社製、初透磁率 $\mu=2500$ でFig. 4に示す周波数特性を持ったMn・Znフェライトにした。Fig. 4に示したように、フェライトコアの電力伝達効率は500kHz前後の周波数が最も良く、1kHz以下ではほとんど伝達されない。システム全体を考慮した場合、母線、トランスコア、雷管を含む発破回路のインピーダンスの影響および発破器内部の素子の周波数特性等の理由により、発破器の共振周波数を、最も伝達効率の良い90kHz前後の値に設定した。

2.3 トランスコアのハウジング

トランスコアのハウジングは、Fig. 5(a)に示す洗

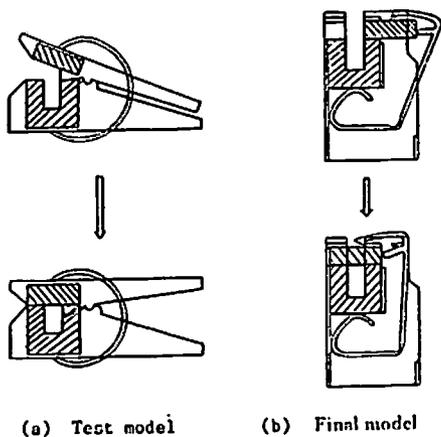


Fig. 5 Housing of the transcore.

湿バサミのような形状のものと、Fig. 5(b)に示すスライド型を試作した。Table 1は両ハウジングの性能を誘導電流の比で示したものである。Table 1によれば、スライド型は泥水などのある実際の発破現場における作業環境下においても二次側の誘導電流の低下は極くわずかである。これは、コアー接合面に異物が付着した場合、コアーがスライドして接合するため自浄作用により接合面に付着した異物を除去するためである。この結果よりトランスコアーのハウジングは、スライド型にした。

2.4 発破器およびテスター

発破器は乾電池を電源とし、DC-DCコンバーターで直流の高電圧に昇圧して充放電用コンデンサーに充電する充電部と、この充電部で作られた直流を交流の

Table 1 Comparison of housing performance between test model and final model against adhesion to dust for joint of the transcore.

Test condition	Transmitting coefficient of test model (%)	Transmitting coefficient of final model (%)
No ailine substance	100.0	100.0
Water mixed sand & mud	30.1	99.6
Sand & mud	22.9	96.5
Water mixed clay	34.3	97.9
Clay	30.1	93.7

高周波に変換するDC-ACインバーターによる高周波変換部で構成されている。また、出力端子には、発破母線とのインピーダンス整合のために小容量の同調用コンデンサーが発破回路に直列に挿入されている。充電電圧は350V、充放電用コンデンサー容量は400 μ Fとした。電流回路である発破母線および補助母線

は、発破器に内蔵された抵抗測定器もしくは発破用テスターで測定を行う。

電気雷管の導通試験は端末がループ状であり、通常のテスターでは測定できないため、電磁誘導を利用した専用のテスターを開発した。

2.5 発破母線および補助母線

Table 2 Relation between lead wire and induced current.

Kind of lead wire	DC resistance(Ω /m)	Induced current(A)
Parallel cable ($s=0.75\text{mm}^2$)	0.022	6.22
Parallel cable ($s=5.50\text{mm}^2$)	0.003	7.16
Microphone cable	0.02	7.98
Parallel shielded cable	0.015	8.11
Coaxial cable (5C-2V)	0.023	7.42
Coaxial cable (5D-2V)	0.008	7.87
Low impedance coaxial cable	0.005	8.75

Lead wire lenght: 20m, Connecting wire lenght: 20m, Leg wire lenght wire lenght: 1.8m Number of transcores: 1, Number of detonators: 1, Section area of cable: s

発破器の発振周波数は、70~110kHzという高い周波数のために、本システムに使用する発破母線についても、通常の電気発破に用いられる平行ビニル線の他に、高周波用のシールド線や同軸線について検討した。

Table 2は発破母線の種類と誘導電圧の関係を示す。Table 2より同軸線は、5.5mm²という極めて断面積が大きく直流抵抗の低い線に比較しても、二次側誘導電流は高い。また、同軸線の中でも低インピーダンスケーブルは特に高いことがわかる。この電線はオームの法則による直流抵抗のみならず、本システムで使用される周波数領域において、交流抵抗であるインピーダンスを低くし、エネルギーの伝送損失を少なくしたものであり、本システムのために特別に開発した電線である。

Fig. 6は通常の平行ビニル線と低インピーダンスとの対比を示す試験結果であるが、この図から、低インピーダンスケーブルを用いた場合、通常の発破作業が実施される条件下、つまり、発破母線長100m、補助母

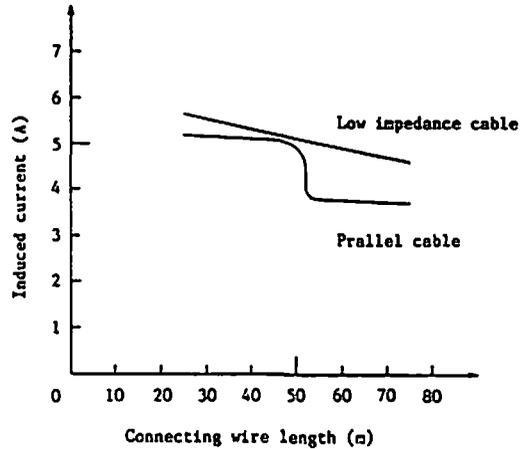


Fig. 6 Relation between connecting wire length and induced current (Lead wire length : 100m, Leg wire length : 1.8m, Number of the transcores : 20, Number of detonators : 100).

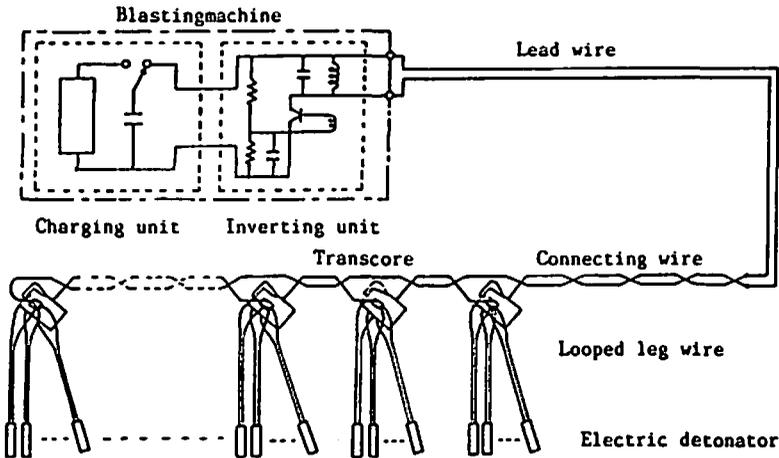


Fig. 7 Outline of MBS.

線長25m~75mにおいて安定した出力が得られることがわかる。このことより、低インピーダンスコードは母線長、補助母線長および斉発数が大きく変化しても、平行ビニル線のようにインピーダンス整合を考慮しなくても幅広く対応できる。また、この電線を使用する場合は発破器に発破回路とのインピーダンス整合のための同調用コンデンサーを用いる必要はない。

以上のことにより、本システムに使用する発破母線は低インピーダンスケーブルを採用することとなった。

また、補助母線は直径0.6mmの単心線を5cmピッチで撚った平行ビニル線とし、トランスコアーにより電気雷管を任意の位置に装着できるようにした。

以上のようにして決定されたMBSの実用モデルの説明をFig. 7に示す。

また、Fig. 8は発破器から出力される高周波電流の発振波形である。周波数は約90kHz、立上り部分のピークからピークまでが20A前後の交流電流であり、約30msで減衰する。

電気雷管は、脚線の端末部を短絡し、絶縁処理をし、直径6cm程度のループ状にした耐静電気雷管であり、また、補助母線と電気雷管との結線については、一次側の補助母線および二次側の脚線とも一回巻となっている。

3. 安全性の検討

3.1 漏洩電流に対する安全性

漏洩電流による暴発や、リークによる不発に対しては、本システムの場合、電気雷管の端末は常に短絡されており、その結線はトランスコアーを用いて電磁的に行なわれるため、裸線による結線部は母線と補助母線の結線部ただ一個所であり、この部分についてさえ注意を払えば、結線部から漏洩電流が流入したり、発破器からの電流がリークするという事はない。

母線に直流の漏洩電流が流入した場合を想定して母線に直流電流を流し、その安全性を試験した結果をTable 3に示す。Table 3より、直流電流が120A流れても二次側の電気雷管は起爆せず安全であることがわかる。これは、本システムが電磁誘導を用いた交流発破方式であり、トランスの原理を用いていることから、原理的に、一次側に直流電流が流れても、トランスコアーには磁束が発生せず、そのため、二次側の電気雷管には一次側の直流電流が誘導されないことに起因している。

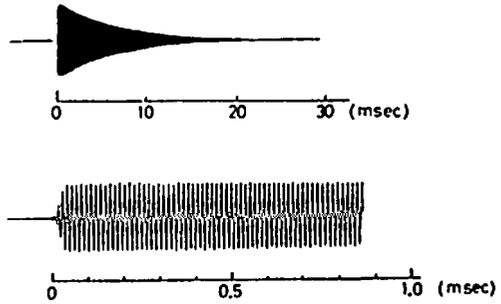


Fig. 8 Waveforms generated by MBS blasting machine.

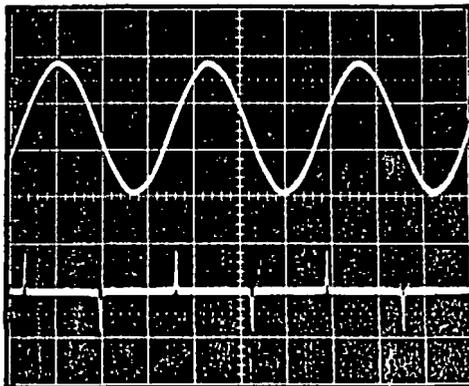
Table 4は、商用電流(50/60HzAc)の漏洩電流に対する安全性を示す結果であり、Fig. 9は本試験に用いた60Hzの交流電流と二次側に現われる波形例である。これらの結果より、商用電流の場合、一次側に100A程度流れても、Fig. 4に示すトランスコアーの周波数特性および磁気飽和現象により、二次側にはほとんど

Table 3 Safety against stray direct current.

Stray direct current (A)	Induced current (A)	Results
30	0	Not fired
60	0	Not fired
120	0	Not fired

Table 4 Safety against stray alternating current.

Stray alternating current (A)	Induced current (A)	Energy induced by one cycle (mJ)	Results
10	0.06	0.0064	Not fired
30	0.15	0.0156	Not fired
50	0.23	0.0235	Not fired
100	0.42	0.0419	Not fired



Alternating current
 I_1 : 100 A rms
 (100 A/div)

Induced current
 I_2 : 0.42 A peak
 (0.5 A/div)

(t : 5 ms/div)

Fig. 9 Waveforms of alternating and induced current
 (Frequency of alternating current: 60Hz)

Table 5 Protection against leakage current.

Firing method	Medium	transcore×shots*	Results
MBS	Fresh water	20×5	Fired
MBS	Sea water	20×5	Fired
MBS	Dil. CH ₃ COOH	20×5	Fired
MBS	Na ₂ CO ₃ Soln.	20×5	Fired
Series connection**	Sea water	100 (shots)	89 not fired

(*) In MBS, Number of transcores were 20 and 5 detonators were held each transcore.

(**) Conventional type.

Table 6 Safety against static electricity

Firing method	Discharging voltage (kV)	Results
MBS	5.0	Not fired
MBS	10.0	Not fired
MBS	15.0	Not fired
Series connection*	4.5	Fired

(*) Conventional type.

ど電力が伝達されないため、電気雷管は起爆せず安全であることがわかる。

3.2 リークに対する安全性

Table 5 はリークにより発生する不発の問題を検討するために、MBS の母線、補助母線、トランスコア、電気雷管を、水、海水、酸、アルカリなど各種溶液につけた場合の試験結果である。

本システムの場合、母線と補助母線の結線部さえ十分に絶縁処理を行えば、100発掛の発破器で電気雷管100発を完爆させることができる。

参考までに、従来の直流方式の場合には、海水中において100発中、89発の不発が発生した。

3.3 静電気に対する安全性

静電気に対しては、現在使用されている電気雷管はすべて耐静電気雷管であり、2000pF、8kV の静電気に耐えるが、これは脚線と管体との間の値であって、両脚線間に流れた場合は保証されない。しかし、本システムに用いる電気雷管は、端末部が短絡、絶縁され

ているためにこのような心配はない。

Table 6 は静電気に対する安全性を検討した結果であり、直流の高電圧を印加し充電した2000pFのコンデンサーを、母線に接続し放電させたものである。Table 6 より母線長20m、補助母線長10m、電気雷管1本という条件において、従来の直流方式が4.5kVで電気雷管が起爆するのに対し、本システムでは15kV印加しても起爆しない。

3.4 雷に対する安全性²⁾

雷については、直撃雷は想像を絶する電気現象が発生するため本試験では除外したが、落雷によって地絡電流が発生し、発破回路に流入した場合を想定して安全性の試験を行った。

本試験は中国電力社との共同実験であった。

Fig. 10 は本実験に用いた装置の概略を示すものであり、雷インパルス発生装置を一次側母線に接続し、二次側の脚線に流れる電流波形を測定した。実験に用いた雷インパルス波形は、立上り8μs、50%までの立下

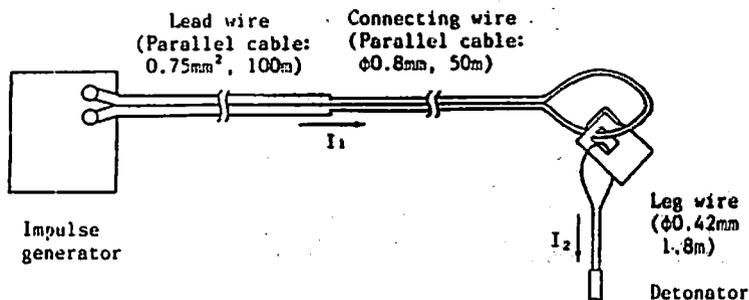
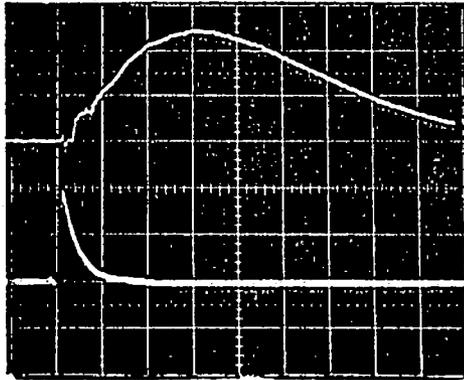


Fig. 10 An apparatus for direct impulse inflow experiments.



Impulse current
 $I_1 : 490 \text{ A}$
 (200 A/div)

Induced current
 $I_2 : 15.2 \text{ A}$
 (8 A/div)

($L : 4 \mu\text{s/div}$)

Fig. 11 Waveforms of impulse and induced current.

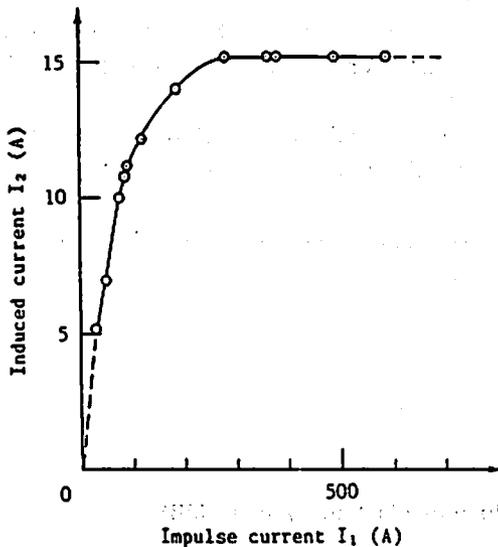


Fig. 12 Relation between impulse current I_1 and induced current I_2 .

り $20 \mu\text{s}$ の標準的な単極性インパルス波形である。

Fig. 11 は雷インパルス電流と脚線電流の波形例であり、Fig. 12 は雷インパルス電流と脚線電流の関係を示すものである。Fig. 12 に示すように雷インパルス電流が 300 A までは二次側の脚線電流は増加するが、それ以上はトランスコアーが磁気飽和現象を起すために増加しない。また、点火玉電橋に供給されるエネルギーは二次側電流波形より得られる雷インパルス電流 490 A の場合は、二次側電流波形の立下り部分を直線で近似すると、 $i(t) = -3.8 \times 10^6 t + 15.2$ で表され、また、電橋の抵抗値は $R = 0.54 \Omega$ であるので、エネルギーは以下のように計算される。

$$W = \int_0^t i^2 R dt$$

$$\cong \int_0^{4 \times 10^{-6}} (-3.8 \times 10^6 t + 15.2)^2 \times 0.54 dt$$

$$= 0.166 \text{ (mJ)}$$

従って、点火玉の最小発火エネルギー 1.28 mJ (点火玉電橋のみの場合) に比べて低いために起爆しない。参考までに、従来の直流方式の場合は、同様の試験法で雷インパルス電流を印加すると、約 18 A で起爆した。

3.5 高圧線の誘導に対する安全性

高圧線の近傍において、発破回路に流れる高圧線からの誘導電流 I_2 (A) は、高圧線に流れる電流 I_1 (A) および発破母線までの距離 h (m)、電気雷管を含む発破回路とから形成されるループの面積 S (m^2)、送電線と発破回路とのなす角 θ_1, θ_2 ($^\circ$)、発破回路の抵抗 R (Ω) によって決まり、以下の式で表すことができる³⁾

$$I_2 = \frac{8.52 \times I_1 S \cos \theta_1 \cos \theta_2 \exp(-1.06 \ln h)}{R} \times 10^{-5}$$

本システムの場合、発破母線および補助母線が平行線のまま敷設され、従来の直流方式のように発破回路がアンテナとなる大きなループを形成せず、わずかに母線と補助母線の結線部、もしくは、補助母線と脚線のトランスコアーで結線する部分のみで、最大でも 100 cm^2 以下である。このような微小ループにおいては、 50 V 送電線で $I_1 = 4000 \text{ A}$ とし、 $h = 20 \text{ m}$ 、 $S = 0.01 \text{ m}^2$ 、 $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ 、 $R = 9 \Omega$ とした場合、 $I_2 = 15.8 \mu\text{A}$ 程度しか流れず、ほとんど問題はない。

3.6 放送電波の誘導に対する安全性

放送電波については、Fig. 4 に示すトランスコアーの周波数特性からみて、 $10 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ までの電波による誘導の危険性が問題であるが、本システムでは前記のようにアンテナの役目をする大きなループを形成する部分がほとんどなく、最大でも 100 cm^2 以下であ

る。このような微小ループに電気雷管を発火させるような誘導電流を発生させる電波は、受信アンテナとして一波長ループアンテナを考えた場合、ループの面積は $A=0.01\text{ m}^2$ より波長は $\lambda=0.1128\text{ m}$ (周波数は $f=2660\text{ MHz}$) である。このループ部に電気雷管の最大不発火電流 $I=0.25\text{ A}$ 以上の電流を誘導させるには、一波長ループアンテナのインピーダンス $Z=100\Omega$ 、発破回路の抵抗 $R=9\Omega$ 、ループの巻数 $N=1$ とすると、以下の式で計算される値以上の電界強度が必要である。

$$E = \frac{I(z+R)}{2\pi NA/\lambda}$$

$$= \frac{0.25 \times (100+9)}{2\pi \times 1 \times 0.01/0.1128}$$

$$= 48.9\text{ (V/m)}$$

この電界強度の値を得るために必要な送信アンテナからの距離は、本議論のような高い周波数 $f=2650\text{ MHz}$ では送信アンテナの種類によって指向性および利得が異なるために特定できない。しかし、従来の直流方式に比べて放送電波に対しても十分安全であると見える。

4. 結 言

MBS は、電気発破作業における安全性の向上と省

力化を目的として開発したものである。本報告で述べたように電気的危険性に対する安全性も従来の直流電気発破システムより十分高く、実用性も高いと考える。我国において行われている発破作業の中で、特に堅坑掘削などで湧水等が多い現場や水中発破などでリークによる不発が心配される場所、また、漏洩電流や静電気その他の心配される現場での使用は有効と考える。

なお、本システムは、昭和59年11月に上市后、漏洩電流の問題で従来より導火線発破が行われていた新釜石鉱山等、各地の鉱山や高圧線下の発破などでは積極的に使用されている。

文 献

- 1) 浮田男, 安部稔:「電気工学要覧」, p79 (昭48), 国民科学社
- 2) 田崎陽治, 黒川孝一, 中野雅司, 植田武雄, 工業化薬協会秋季研究発表講演会要旨集, p. 67 (昭59).
- 3) 黒川孝一, 中野雅司, 添田忠敏, 植田武雄, 工業火薬協会秋季研究発表講演会要旨集, p57 (昭56).
- 4) 古谷恒雄, 「空中線系および電波伝搬」, p161 (1971)

Development of electromagnetic induction blasting system (MBS)

by Yoji TASAKI*, Koichi KUROKAWA*, Masashi NAKANO*
and Takeo UEDA*

MBS (electromagnetic induction blasting system) is a new firing system of electric detonator. This system has much more safety in electric blasting operation and simplifies compared with conventional type (series connection).

Based on the principle of transformer by means of Faraday's electromagnetic induction law, this system is operated as following;

When high frequency alternating current is applied to lead wire (primary circuit), magnetic flux is generated in transcore and induced current flows through the looped leg wire of the detonator (secondary circuit). Then the detonator is ignited by this induced current.

(*Chemicals & Explosives Laboratory, Taketoyo plant, Nippon Oil and Fats Co., Ltd., 82 Nishimon, Taketoyo-cho, Chita-gun, Aichi-ken, 470-23 Japan.)