

鉄道技術研究所 地質研究室

正 ○ 三 沢 清 扶
高 橋 昭 敏

1. 破砕の原理

電気的に中性な分子や原子で構成されている誘電体に電界を加えると、分子や原子のもっている電荷の平均位置が分離して電気双極子となる。また、水のようにもともと分子が永久双極子をつくっている物質の場合には電界のないときには向きのばらばらな個々の双極子が、電界からエネルギーを吸収して電界の方向に整列するようになる。次に、外部電界を取り去ると、整列していた双極子の向きは再びばらばらになってしまう。(図-1)

外部から加える電界が交流電界の場合には永久双極子になっている分子が周波数に応じて分極をくり返したり誘電分極の緩和現象のために電界エネルギーが誘電体に吸収されて熱に変わる。この現象を誘電加熱とよんでおり、この最大の特徴は普通の外部加熱と異なり、被加熱物自体が発熱体となることである。そして、誘電体に吸収される電力は次式で示される。

$$P = 0.556 \cdot f \cdot E^2 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta \cdot 10^{-10} \text{ ----- (1)}$$

ここに

 P : 誘電体に吸収される電力 (W / m³)

 f : 周波数 (Hz)

 E : 加えられる電界の強さ (V / m)

 ϵ_r : 物質の比誘電率

 $\tan \delta$: 物質の誘電正接

ϵ_r , $\tan \delta$ を loss factor と呼び、これらの値は物質の種類、温度、周波数などによって変化する性質をもっている。

この誘電加熱によってコンクリートや岩石が加熱されると、

- ① 熱応力の発生。
- ② 岩石自体の熱による構成成分の組織的、化学的变化。
- ③ 岩石内部の過熱蒸気圧の発生。

などの競合作用により破砕するものである。

2. 電磁波発生装置

電磁波の発振管としては種々なものがあり、高出力用としてはマグネトロンとクライストロンが主として使用されているが、経済性、効率、回路構成などの面より今回はマグネトロンの使用している。マグネトロンは2極真空管であり、その原理は図-2に示すとおりである。

電磁波発生装置は電源部、発振部、照射部、リモートコントロール部、漏洩電波検出器、導波管、フレキシブル同軸ケーブル、電磁ホーンなどより構成されている。図-3は装置のブロック図を示したものである。

電源部はマグネトロンの動作に必要な高圧電源、ヒーター電源、マグネット電源およびコントロール部電源で構成されており、マグネット電源を調整することにより出力を可変としている。

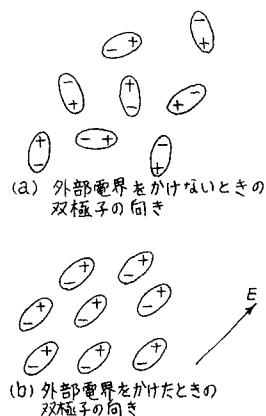


図-1 電磁界に対する双極子の配列

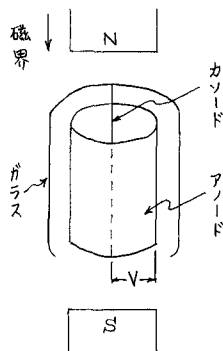


図-2 マグネトロン

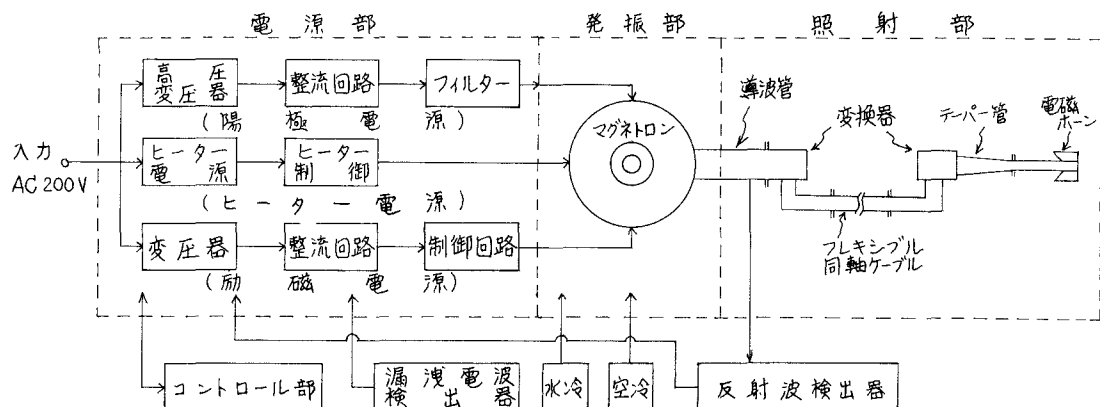


図-3 電磁波発生装置ブロック線図

発振部はマグネトロン、ヒータートランス、出力測定回路、反射波検出装置、冷却機構および保護回路などにより構成されている。保護回路としては反射波、陽極電流の過電流防止、動作時に発振部のパネルを外したときのドアスイッチ、冷却水の水压、空冷の風圧およびマグネトロン過熱防止ならびに過大漏洩電波の検出時にそれぞれ作動するようにしている。

照射部は導波管、変換器、フレキシブル同軸ケーブル、電磁ホーンにより構成されている。電磁ホーンは角錐型、扇形、丸形あるいは導波管よりもせまくしぼったものなど用途に応じて交換できる。

リモートコントロール部は照射部から離れた地奥からでも運転できるようにしたもので、ヒーター、マグネット、高圧電源の“ON”“OFF”スイッチ、照射時間を設定するタイマー、マグネット電流を調整するダイヤル、ならびに出力、反射波検出メーターなどにより構成されている。

3. 電磁波の性質

1) 周波数と波長の関係

周波数と波長との間には次の関係式がある

$$\lambda = 3 \times 10^8 / f$$

ここに、 λ : 波長 (m) f : 周波数 (Hz)

2) 電磁波の分類と用途

通常電波と呼ばれるものの分類と用途を大別すると表-1に示すとおりである。

表-1 電波の分類と用途

周 波 数	波 長 (m)	周波数の略称	名 称	おもな一般用途	工 業 用 途
30 ~ 300 kHz	$10^4 \sim 10^3$	LF	中 波	中波短波放送用	高周波誘導加熱
300 ~ 3000 "	$10^3 \sim 10^2$	MF			
3 ~ 30 MHz	$10^2 \sim 10$	HF	短 波	テレビ放送	高周波誘電加熱
30 ~ 300 "	$10 \sim 1$	VHF	超短波		
300 ~ 3000 "	$1 \sim 0.1$	UHF	極超短波	通信レーダ	
3 ~ 30 GHz	$0.1 \sim 0.01$	SHF	(マイクロ波)		
30 ~ 300 "	$0.01 \sim 0.001$	EHF	ミリ波	通 信	

3) 電磁波出力と温度上昇との関係

誘電体に吸収される電力は先の(1)式に示したとおりであり、電磁波出力のみを変化させ、他の条件は一定とした場合の各出力と岩石温度との関係は図-4に示すごとくほぼ出力に比例した温度が得られる。

4) 電磁波の浸透深さ

浸透深さは均質被加熱物に垂直に入射する電磁波のエネルギーが $1/e \approx 37\%$ になる距離をもって慣例的に定義され次式で表わされる。

$$D = \frac{9.56 \times 10^7}{f \times \sqrt{\epsilon_r} \times \tan \delta} \quad \text{----- (2)}$$

ここに

D: 電磁波の浸透深さ (m)

f: 周波数 (Hz)

ϵ_r : 物質の比誘電率

$\tan \delta$: 物質の誘電正接

図-5は岩種別に岩石孔内温度の距離による減衰勾配を示したもので、同一照射条件であっても岩石により ϵ_r , $\tan \delta$ の値が異なるので当然浸透深さも異なり、特に花崗岩のように ϵ_r , $\tan \delta$ の小さな岩石では波長と同じ深さの部分で最高温度を示すような特異現象が得られている。

5) 照射距離と温度上昇との関係

電磁ホーンと岩石表面までの照射距離のみを変化させ、他の照射条件を一定とした場合の距離と温度との関係は図-6に示すとおりで、角錐型あるいは扇型電磁ホーンのように先太にした形状の電磁ホーンを使用する場合は距離の増大とともに照射密度が低下するので、温度上昇は低くなる。

6) 含水率の影響

誘電加熱による場合、その温度上昇率は先の(1)式に示したように物質の比誘電率、誘電正接の大小により異なるものであり、この値は同一物質の場合でも含水率の大小によって変化する性質をもっている。

岩石の含水率以外の他の照射条件を一定とし、含水率の大小による温度上昇率との関係を見ると、定量的には表現し難いが、定性的には含水率の大きいものほど温度上昇率は大きくなる性質をもっている。

4. 熱破碎に要する温度と照射時間

熱破碎に必要な温度は当然被破碎物の種類によって異なるものであるが、同一物質の場合でも照射条件によって異なり、温度上昇率を大きくした照射の場合は比較的低温度でもクラックの発生ないし破碎が認められるが、温度上昇率の小さい場合は先に同一温度あるいはそれ以上に達してもクラックの発生も認められず、逆に圧縮強度などは大きくなることもある。

温度上昇率の大きいということは熱応力の発生も大きいことであり、破碎は主として引張強度の大小によって

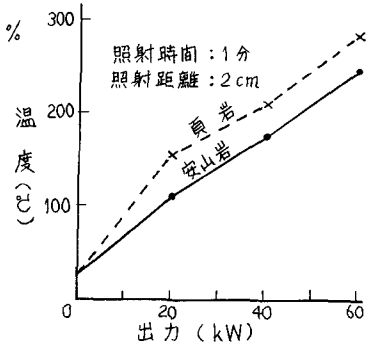


図-4 出力と岩石温度

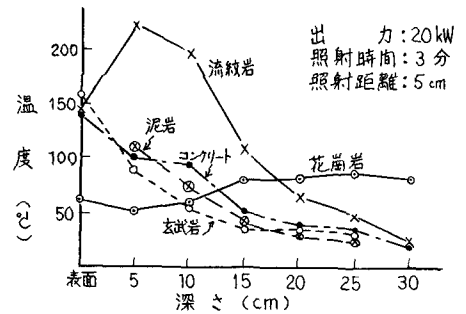


図-5 浸透深さ

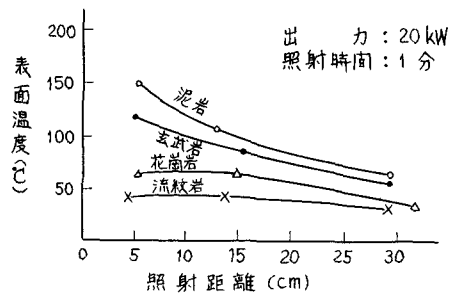


図-6 照射距離と温度上昇との関係

影響されるので、熱応力の発生の割合が大きいほど破砕効果は向上する。このことは電磁波により岩石などを熱破砕しようとするときは照射範囲を限定し、急激な温度上昇により強力な熱応力の発生をうながすような照射方法を採らなければならぬことを示したものである。

一方、温度上昇率の小さい場合は、例えばレンガ、陶磁器にみられるように、焼結作用により、かえって強度の増加が現われるものである。

図-7は各種岩石に対する電磁波出力：20 kWの場合の照射時間と破壊温度の一例を示したものである。

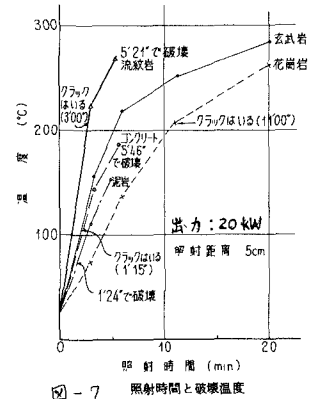


図-7 照射時間と破壊温度

5. 電波障害

電波は空気中では自由に伝播するので目的の異なる電波が相互に干渉しないように用途に応じて周波数の割当を受けている。工業用、科学用、医学用 (Industrial Scientific Medical Uses) マイクロウェーブ機器については1959年Genevaにおいて、Federal Communication Commissionが用かれ、通信用周波帯と区別してイ) 915 MHz $\pm$ 25 MHz, ロ) 2450 MHz $\pm$ 50 MHz, ハ) 5800 MHz $\pm$ 75 MHz, ニ) 22125 MHz $\pm$ 225 MHz を通信用周波数帯と区別して I.S.M. バンドとして指定している。わが国においては、このうち915 MHz 帯については一部 I.S.M. 以外の用途にも用いられているので特に使用に当っては電波漏洩には注意しなければならない。

この通信障害に対する防止策としては、理論上波長の $1/4$ 以下の打抜き金網などで作業場をしやへいしてやれば電波はしや断され通信障害を起こすことはなくなる。

一方、電磁波による人体に対する障害は、電磁波を身体内に吸収することによって生じ、その影響は身体表面よりもむしろ身体深部への浸透性により、身体深部に熱を発生し体温が上昇することによって生ずるものである。一般に目ならびにこう丸は他の器官に比して血液循環が少なく、熱放散が少ないので最も障害を起こし易い。

わが国では電子レンジに関しては安全基準が設けられており、それによれば器体表面からの漏洩電波は器体から5 cm離れたあらゆる箇所において電力密度が $5 \text{ mW} / \text{cm}^2$ 以下とされている。これは正常状態における人体の平均熱放散量は $5 \text{ mW} / \text{cm}^2$ とされているので、これ以下ならば電磁波に身体を暴露した場合も体温の上昇をきたさずなんらの障害も起らないとしたものである。

図-8はハッカネズミに電磁波を照射し、そのときの直腸温度を照射距離別に測定したもので、いずれも直腸温 45°C 前後で死亡した例を示したものである。

人体に対する電波障害の防止には、直径数ミクロンのステンレス線を混紡し織物としたものあるいは銀、銅などを基布に鍍金、蒸着させたものなどで作業服を製作し、着用することによって完全に防止できる。

6. 今後の見通し

現在(2月末)連続出力：60 kW、周波数：915 MHz の発振機を購入し、機動性、騒音、電波障害などにつき基礎試験を行なった後、現場試験を行ない経済性についても検討を加え、将来は、コンクリートの破砕はもちろんのことトンネル掘さくなどにも利用面をひろげていく予定である。

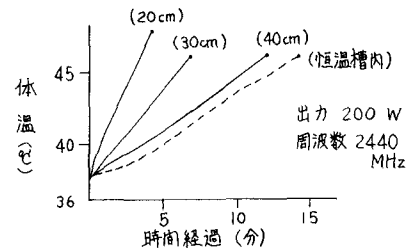


図-8 マイクロ波照射によるハッカネズミの体温上昇