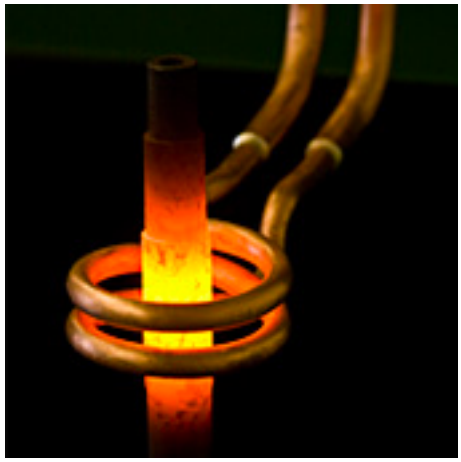
産業IH機器

高周波誘導加熱

高周波誘導加熱を利用した設備を検討する際に必要な「表皮効果と電流の浸透深さ」、「金属の種類と電流浸透の深さ」や「誘導加熱に必要な電力」など技術者向けの理論や計算式を紹介いたします。



従来、高周波誘導加熱方式では加熱ができなかった用途や環境にやさしい誘導加熱方式への転換により、新しい誘導加熱方式の用途が広がっています。

目次

誘導加熱の原理

誘導加熱による表皮効果と電流の浸透深さ

誘導加熱による金属の周波数と電流浸透の深さ

誘導加熱に必要な電力計算

誘導加熱による放射電力損計算

誘導加熱による金属の放射率表

誘導加熱による主要金属の物理定数表

高周波誘導加熱の原理

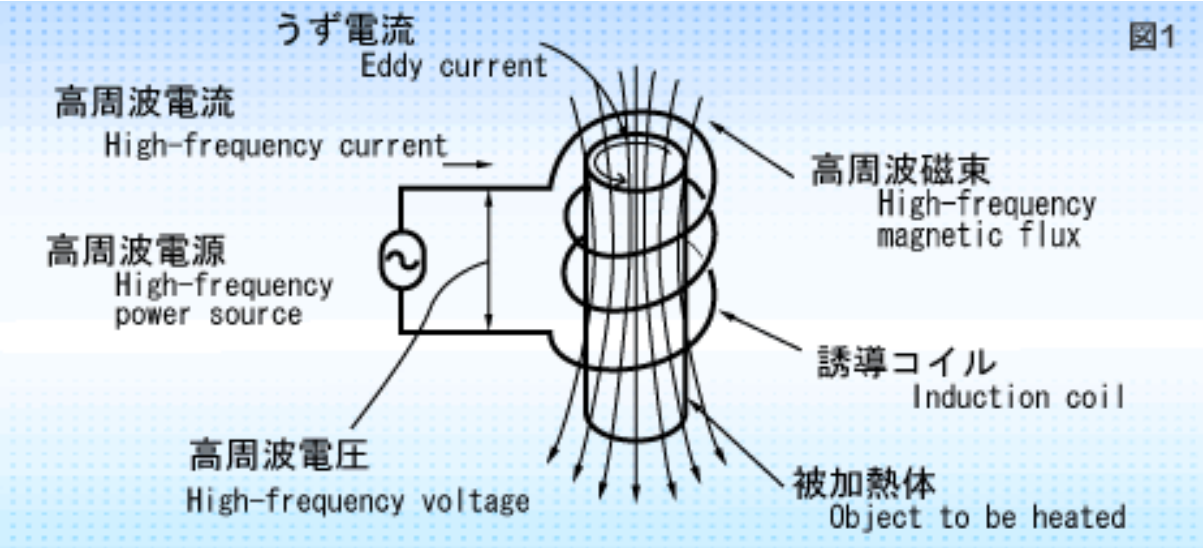


図1に示すように、丸棒状の金属（被加熱物）の周りにコイルを巻いて、この加熱コイルに交流電流を流すと、被加熱物の表面から加熱されて赤くなっていきます。

これは高周波電流によってできる高周波磁束が、被加熱物を貫通して非常に密度の高い電流（うず電流と呼ばれる）を誘導し、これによって被加熱物の表面が加熱されるからです。

このように、コイルからはなれて置かれた金属に電流が誘導され、金属が加熱される現象を誘導加熱といいます。このうず電流は被加熱物の表面に近いほど強く、内部にいくにつれて、指数関数的に弱くなります。これを表皮効果といいます。

図2はこの表皮効果を示したものです。うず電流が表面における強さの0.368倍に減少した点までの深さを電流浸透深さと呼び、誘導加熱を利用する上で非常に重要な数値となります。電流浸透深さは、普通δで示します。

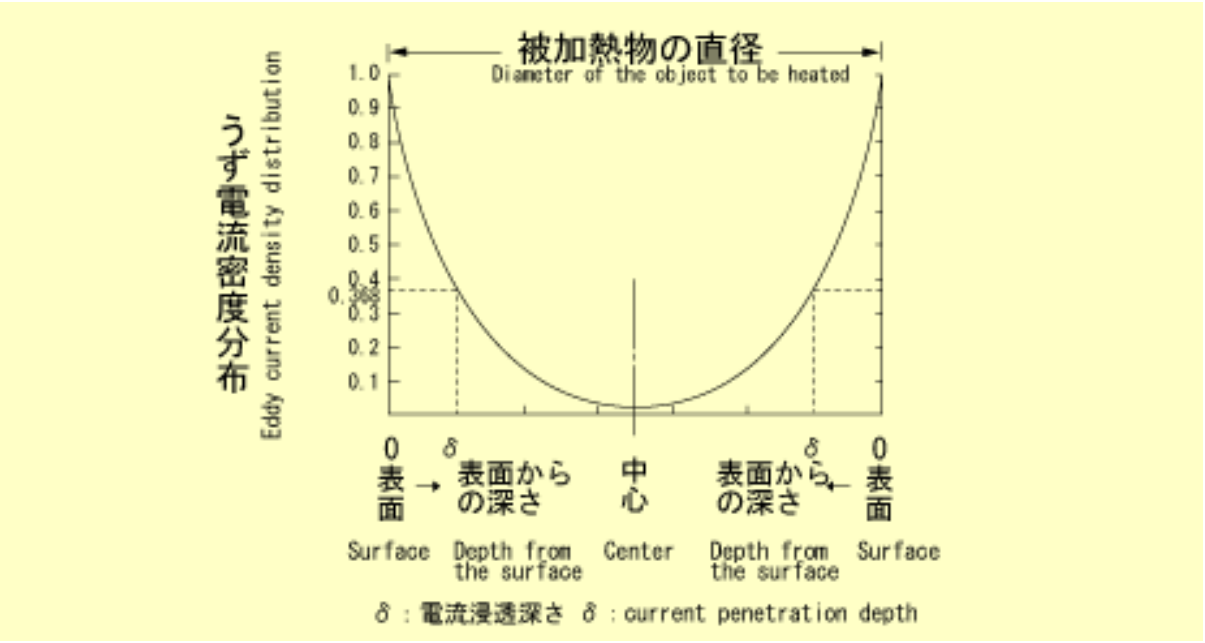
図2

$\delta = 5.03\sqrt{\rho/\mu f}$ (cm)　ρ：被加熱材の抵抗率（$\mu\Omega$・cm）
μ：被加熱材の比透磁率
（磁性材では$\mu > 1$、非磁性材では$\mu = 1$）
f：周波数（Hz）

$\delta = 5.03\sqrt{\rho/\mu f}$ (cm)
ρ: resistivity of the material to be heated ($\mu\Omega$・cm)
μ: relative permeability of the material to be heated
(for magnetic material $\mu > 1$, for non-magnetic material $\mu = 1$)
f: frequency (Hz)

誘導加熱の理論式

高周波誘導加熱による表皮効果と電流の浸透深さ

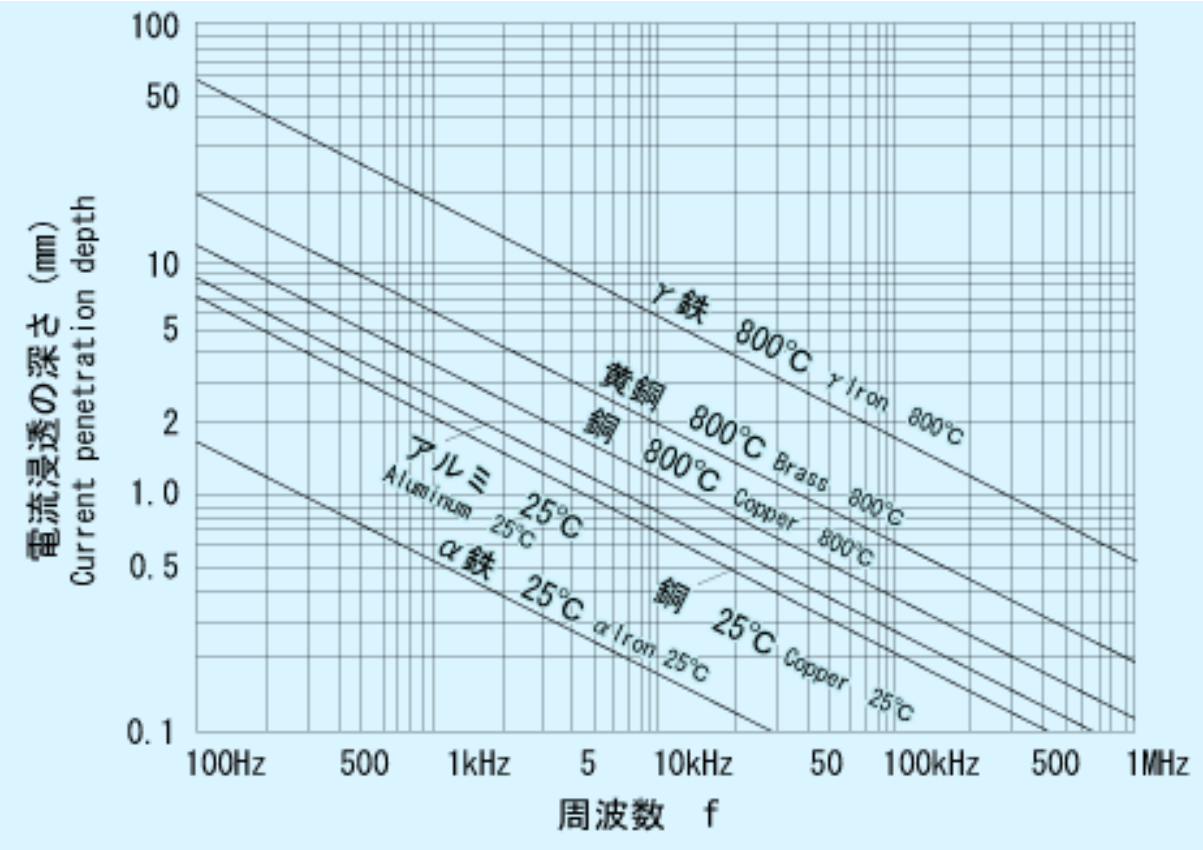


誘導加熱の理論式から、材質が同じものを誘導加熱すると（ρ/μ＝一定のとき）周波数が高いほどδは小さくなり、発熱部が表面近くに集中されることがわかります。

表面焼入れの場合は、周波数を高くして電流浸透深さを浅くし、さらに加熱時間を短くすることにより、表面に発熱部を集中させてからすぐに冷却する必要があります。

一般的に表面の電力密度は1～5kW/cm2となります。これに対して、全体の均熱加熱の場合は周波数を低くして、電流浸透深さを被加熱物の直径の1/3～1/7程度とし、加熱時間も比較的長くとります。

高周波誘導加熱による金属の周波数と電流の浸透深さ（代表例）



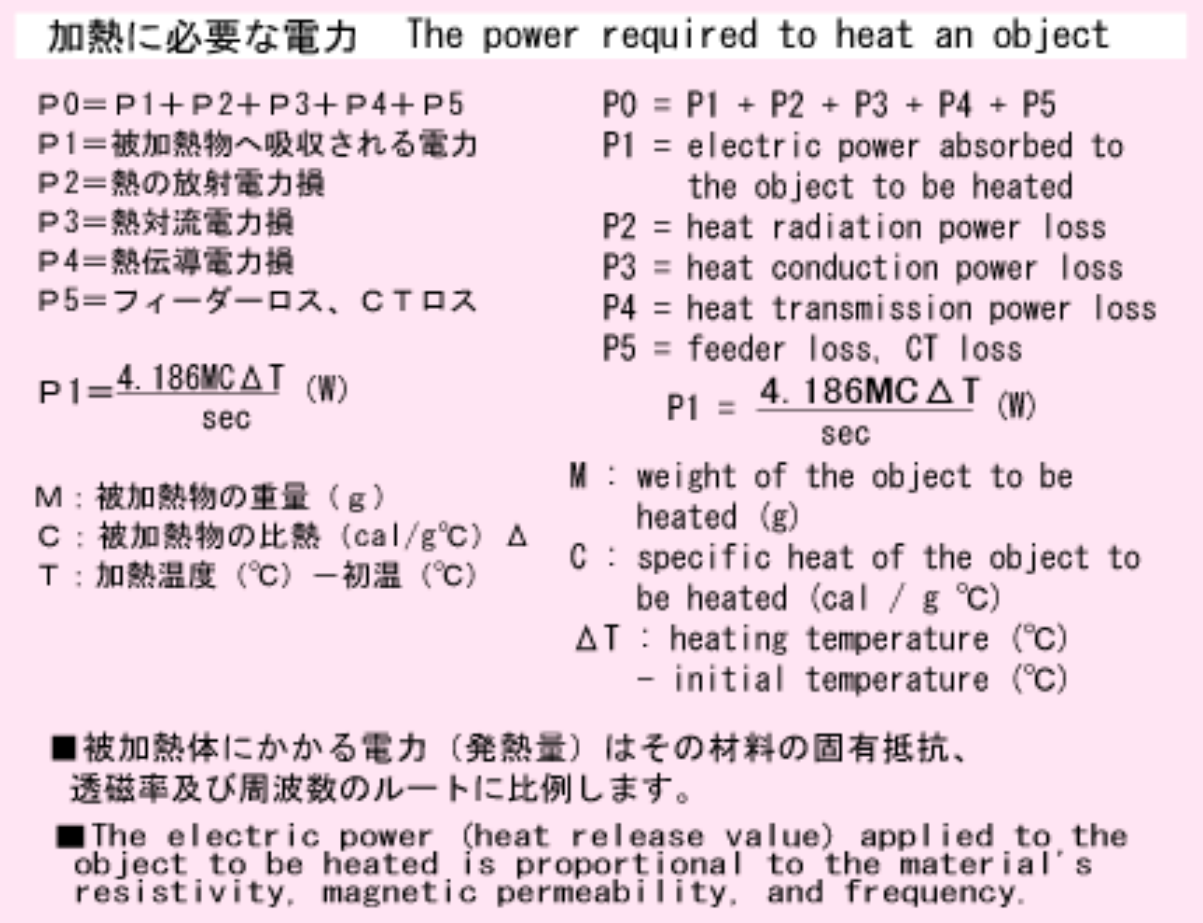
金属の周波数と電流浸透の深さ（代表例）

Metal frequency and current penetration depth (representative examples)

【注】γ鉄はキューリー点以上の温度の時で、ρ=125、μ=1とした場合、黄銅は約800℃の場合でρ=15、μ１とし、銅は約800℃の場合（ρ=5、μ=1）と常温の場合（ρ1.7、μ=1）を示しています。
またα鉄は常温の場合でρ=10、μ=100として示しています。

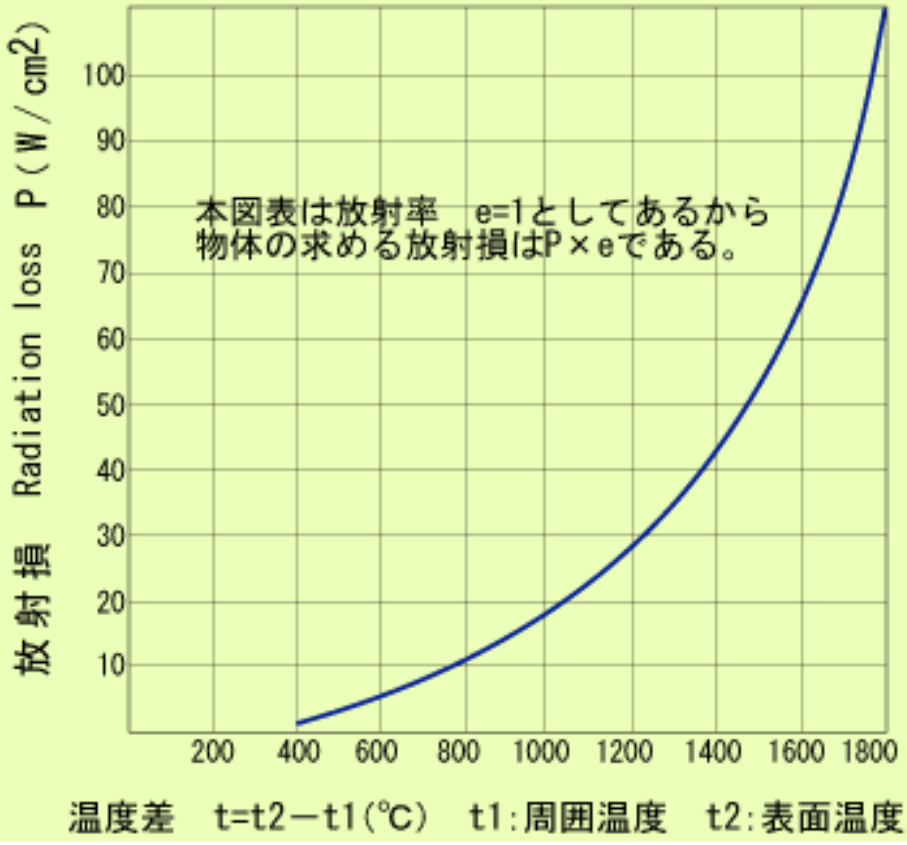
高周波誘導加熱に必要な電力計算式

高周波誘導加熱に必要な電力計算非加熱物の温度するために必要な電力の計算です。



高周波誘導加熱による放射電力損計算

$$P_2=5.74e\times\left[\left(\frac{273+t_2}{1000}\right)^4-\left(\frac{273+t_1}{1000}\right)^4\right]\ (W/cm^2)$$



高周波誘導加熱による金属の放射率

金属名	温度 (℃)	磨面	酸化面
アルミニウム	200～600	0.04	0.2～0.3
銅（磨き）	200～600	0.02	0.57
銅（光沢無）	200～600	0.04	0.79
銀	200～600	0.035	-
黄銅	50～350	0.13～0.4	0.02
ニッケル	200～600	-	0.37～0.48
モーネルメタル	200～600	-	0.41～0.46
炭	125～600	-	0.79～0.81
タンタラムフェラメント	1200～3000	-	0.194～0.31
タングステンフェラメント	27～3300	-	0.032～0.35

高周波誘導加熱による主要金属の物理定数表

金属	記号	原子量	密度	融点	沸点	比熱	熱伝導率	体積固有抵抗	体積固有抵抗の温度係数
			g/cm3	℃	℃	cal/g・℃	cal/g・℃	μΩ・cm	×10-3
亜鉛	Zn	65.37	7.14	419.4	910	0.0925	0.273	5.9	4.2
アルミニウム	Al	26.98	2.69	658.3	1800	0.214	0.539	2.75	4.2
イリジウム	Ir	192.2	22.4	2454±3	>4800	0.0323	0.141	6.5	3.9
黄銅		-	8.55	950	-	0.064	0.204	6.2	4.1
金	Au	96.96	19.3	1063	2710	0.031	0.708	2.2	4.0
銀	Ag	107.86	10.5	960.5	1900	0.056	0.999	1.62	4.1
グラファイト		-	2.25	-	-	0.17	0.057	800	-
クローム	Cr	51.99	7.14	1615	2200	0.105	-	2.6	-
硅素	Si	28.08	2.33	1410	2600	0.168	0.2	63.9×106	-
軟鋼		-	7.8	1500	-	0.12	0.11	19	2
硬鋼		-	7.8	1400	-	0.12	0.11	20	2
コバルト	Co	58.93	8.9	1480	3000	0.093	0.165	7	6.0
錫	Sn	118.69	7.35	231.9	2260	0.09	0.154	11.4	4.5
ステンレス鋼（磁性）		-	7.7	1570	-	0.14	0.08	60	2.0
ステンレス鋼（非磁性）		-	8.0	1470	-	0.14	0.08	89	2.1
セレン	Se	78.96	4.62	180	688	0.086	-	-	4.5
タングステン	W	183.85	19.24	3400±50	5900	0.0321	0.399	5.5	5.3
炭素	C	12.01	3.52	3500	4200	0.165	0.057	3500	0.9
タンタル	Ta	180.94	16.64	3030	5300	0.036	0.133	15.5	3.3
チタン	Ti	47.90	4.51	1800	>3000	0.146	0.13	2	3.47
鉄（鈍鉄）	Fe	55.84	7.866	1535	3235	0.108	0.177	9.8	6.6
銅	Cu	63.54	8.929	1083	2336	0.0916	0.935	1.72	4.33
トリウム	Th	232.03	11.85	1845	>3000	0.0316	0.092	19	5.0
鉛	Pb	207.19	11.34	327.43	3235	0.0309	0.084	21.9	4.2
ニッケル	Ni	58.71	8.9	1455	3075	0.1065	0.201	7.24	6.7
白金	Pt	195.09	21.45	1769	4300	0.0318	0.167	10.6	3.9
ベリリウム	Be	9.01	1.857	1350	1500	0.397	0.393	18.5	3.3
マグネシウム	Mg	24.31	1.74	651	1110	0.243	0.37	4.5	4.0
マンガン	Mn	54.93	7.3	1260	1900	0.121	-	-	-
燐青銅		-	8.0	-	-	0.1	-	7.8	1.8
ロジウム	Rh	102.90	12.4	1966	>2500	0.058	0.209	5.1	4.4