

資料

特集 セッコウ・石灰・セメント・地球環境の科学への期待

カルシウム、マグネシウムの生体中での挙動*

糸川嘉則**

1 はじめに

地球の表層部分の元素の重量比をしめすクラーク数によればカルシウムは3.4%、マグネシウムは1.9%存在することになっている。人体のなかには成人でカルシウムは約1000gで2%含まれているが、マグネシウムは25gであるから0.05%しか含まれていない。そして、カルシウムとマグネシウムは周期律表で共に2A族に属し、化学的性質が類似している。生体内にはレセプター(受容体)と呼ばれる種々な高分子が存在し特異な物質と結合して作用を発揮する。そして、化学的性質が類似している物質は同じレセプターに結合する可能性がある。類似した性質を有する両物質がレセプターに結合し、どちらも生理活性をしめす場合、この両者は代用作用という関係が成立する。また一方の物質が結合した場合のみ生理活性が発揮され、ほかの物質が結合した場合は生理活性が発揮されない場合は、阻害作用となり、両者は拮抗関係をしめすことになる。カルシウムとマグネシウムの間にはこの両方の関係が成立するようである。すなわち、ある場合は代用作用や共同作用をするが、ある場合は拮抗作用をしめすのである。このカルシウムとマグネシウムの共同作用と拮抗作用が複雑に反応して、生体機能を円滑に動かしているのである。

2 カルシウムについて

表1にヒトの組織中のカルシウム濃度をマグネシウム濃度と対比してしめす。カルシウムはその99%以上が骨や歯の硬組織中にヒドロキシアパタイトという結晶の形で存在する。モル比から計算した骨のなかのヒドロキシアパタイトのミネラルの平均的な組成を

表1 ヒト組織中カルシウム・マグネシウム濃度

	カルシウム	マグネシウム
血清 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	94	21
肝臓 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	50	
心臓 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	70	180
筋肉 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	70	190
脳 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	150	390
腎臓 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	180	310
骨 ($\mu\text{g}/\text{g}$)	197,000	3,000

種々な論文による

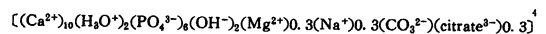
図1 ヒドロキシアパタイト¹⁾

図1にしめす。骨や歯がその硬さをたもっているのはこの結晶が骨の基質に沈着するからである。骨に存在するカルシウムはホメオスタシス(生体の恒常性をたもつための調節作用)により容易に利用できるカルシウム源である。骨以外のカルシウムの体内存在量はきわめて微量でマグネシウムよりも低濃度であるが、脳や神経のはたらきを円滑にしたり、ホルモンの分泌に関係したり、出血したときの血液の凝固する仕組みに関与したり、色いろな重要な作用をしている。しかし、カルシウムが不足しても、このような重要な仕組みに急に影響がでることにはならない。それは、カルシウムの貯蔵庫である骨からカルシウムが動員されてくるからである。カルシウムはつねに骨からでたり、入ったりをくり返している。

このホメオスタシスには血漿カルシウム濃度とホルモンとして副甲状腺ホルモン(PTH)、カルシトニン、

* Metaoblism of Calcium amd Magnesium in Animal Body

** Yoshinori ITOKAWA

およびビタミンとしてビタミンDが関係している。副甲状腺ホルモンは腸管からのカルシウムの吸収を増加させ、腎臓からのカルシウムの排泄を減少させ、骨へのカルシウムの沈着を増加させる作用がある。ビタミンDは 1.25-(OH)_2 ビタミンDという活性型に変換して副甲状腺ホルモンと同様な作用をしめす。一方、カルシトニンは副甲状腺ホルモンとは逆に腸管からのカルシウムの吸収を減少させ、腎臓からのカルシウムの排泄を増加させ、骨へのカルシウム沈着を抑制する作用がある。すなわち、食事からのカルシウム摂取量が不足し、血漿カルシウムが減少すると副甲状腺ホルモンの分泌が増加し、カルシトニンの分泌が減少する。そして、副甲状腺ホルモンの刺激により 1.25-(OH)_2 ビタミンDが産出される。これら一連の動きは、血漿カルシウム濃度を正常値にたもつようにはたらくのである。したがって、食事からのカルシウムが不足しても、人間はすぐには病気にはならないが、骨や歯のカルシウム量が減少する。そして、長期間にわたってカルシウムが欠乏すると骨の量が減少して骨粗鬆症という疾患になる。この病気は骨が脆くなるから身体の重さをささえる力がなくなり、骨折を起こしやすくなる。

胎児の発育に必要なカルシウムは母親の骨や歯に貯蔵されているカルシウムがもちいられるから、妊産婦はとくにカルシウムが必要である。妊産婦のカルシウム摂取量が不足すると、骨のカルシウム量が減少し、高齢になってから骨粗鬆症になるし、また、お産を済ませた後、歯が悪くなる。一方、子供の側から考えると歯は胎児期と乳児期に形成されるので、母親のカルシウム摂取量が低いと、子供の歯の質が悪くなり、虫歯にも罹りやすくなる。顎の骨の発育も悪くなり、歯ならびが悪くなる。このような意味からも将来妊産婦となる若い女性は日頃からカルシウムを十分に摂って強い骨をつくっておくことが必要である。

カルシウムの必要量はカルシウム所要量という名前で国により決められている。すなわち、カルシウム所要量というのは国民が健康な生活を維持するうえに必要なカルシウム摂取量である。そして、カルシウム所要量は出納試験により平衡を維持できる量を基本として決められる。出納試験とは種々なカルシウム量を含む食事や尿、汗、毛髪、爪などから体外に排出されるすべてのカルシウム量を測定して、カルシウムの出入り勘定を調べる方法である。食事から入るカルシウム量が失われるカルシウム量より多ければ、カルシウムは体内に蓄積されるので

正出納、食事からのカルシウム量が体外に排泄される量より少なければ、体内のカルシウムは徐々に減少するから、負出納になる。そして、食事から入ってくるカルシウム量と体外にでてゆく量が等しければゼロ出納となり、これを平衡維持量といい、この量よりカルシウム摂取量が多ければ、少なくともカルシウムが欠乏することはないと考えられる。

そして体重1kg当たり10mgのカルシウム摂取で平衡がたもてるので、この量を基準として所要量の算定が行われている。そこで、成人の体重を60kgとして600mgという成人のカルシウム所要量が算定されている。また、成長期には平衡を維持するのに必要なカルシウム量に加えて、骨の発育に要するカルシウム量が必要で、たとえば13歳男子では900mgとなる。また、妊娠時、授乳時などにはそれぞれ胎児の発育や乳汁分泌などに要するカルシウム付加量が考慮されている。

表2にWHOの食糧需給表からみた世界各国の一人一日当たりのカルシウム摂取量をしめす。カルシウム摂取量には国により非常に大きな格差があり、一番カルシウム摂取量の多いアイスランドでは一番低いバングラデシュの約10倍のカルシウムを摂取している。

表2 世界各国のカルシウム供給量(一人一日当たり)

	総カルシウム mg/day	動物食品より mg/day
アイスランド	1307	1148
オランダ	1049	846
西ドイツ	921	706
アメリカ合衆国	881	707
カナダ	860	675
チェコスロバキア	825	638
ロシア	762	563
アルジェンチン	658	471
日本	559	339
エジプト	434	143
インド	421	181
ナイジェリア	301	28
中国	244	36
タイ	219	69
ザンビア	216	55
フィリピン	206	103
バングラデシュ	143	62

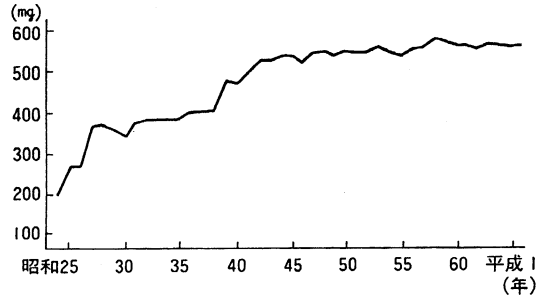
1984-1986 WHO 食糧需給表より

表3 カルシウム摂取量と調査対象のカルシウム所要量との比較 (調査対象の平均カルシウム所要量を100とする)

年度	%
昭和50年(1975)	91
51(1976)	91
52(1977)	91
53(1978)	93
54(1979)	91
55(1980)	90
56(1981)	92
57(1982)	94
58(1983)	97
59(1984)	94
60(1985)	92
61(1986)	91
62(1987)	91
63(1988)	87
平成元年(1989)	89
2(1990)	88
3(1991)	90

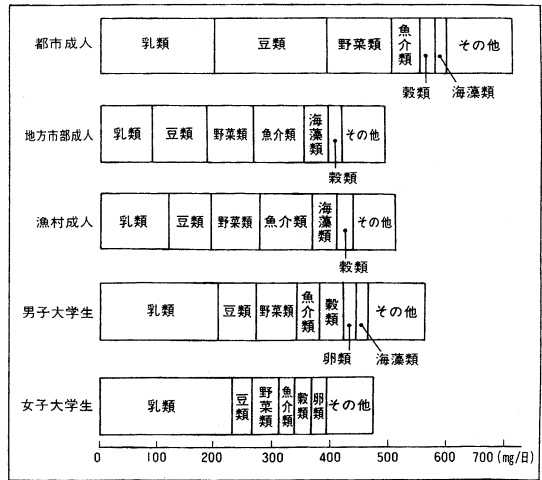
上位をしめるのは欧米諸国で、アジア、アフリカなどの開発途上国が下位をしめている。日本はその中間に位置している。一方、カルシウム摂取源からみると欧米諸国は動物性食品からのカルシウム摂取量が多く、開発途上国では植物性食品からのカルシウム摂取量が多くなっている。この比率も日本は中間にある。

厚生省では国民の栄養状態を知るために毎年国民栄養調査を実施している。図2は国民栄養調査による昭和22年から現在に至るカルシウム摂取量の推移をしめている。昭和20年代は200 mg という現在の開発途上国でも最低のレベル程度であったが、徐々に摂取量が増加している傾向が見られる。しかし、近年は横這いになっている。また、各年度における国民栄養調査の調査対象者のカルシウム所要量と摂取量を比較すると、このような計算が初めて行なわれた昭和50年以來ずっとカルシウム摂取量は所要量に達していない。現在、国民栄養調査で調査されている栄養素のなかでカルシウムだけが唯一摂取不足となっている。



資料：国民栄養調査

図2 カルシウム摂取量の年次推移(1人1日当たり)

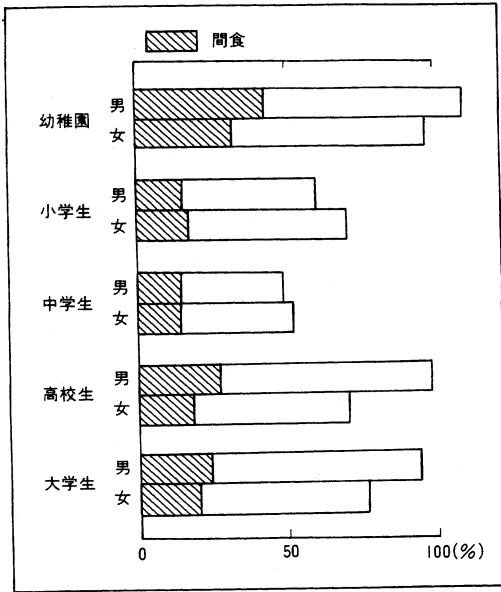


木村美恵子, 糸川嘉則ほか：微量栄養素研究, 1, 71, (1984)

図3 種々なグループにおける食品群別カルシウム摂取量

図3には種々なグループを対象に食事調査を行ない、カルシウム摂取量を計算した結果をしめす。都市在住の成人は比較的カルシウム摂取量が高く、乳類、豆類、野菜類が主要なカルシウム摂取源となっている。地方の市部および漁村の成人は乳類の摂取量が低く、その分カルシウム摂取量が低くなっている。大学生は乳類の摂取量が多く、良いカルシウム源となっているが、そのほかの食品からのカルシウム摂取量が少ない。とくに女子大学生は500 mg を切るというカルシウム摂取不足の状態にある。

図4は幼稚園から大学生までの児童、生徒、学生を男女別に分けてカルシウム摂取量を調査し、所要量との比率をしめた。これらの若者にカルシウム摂取量がかなり低いグループがある。また、間食が生徒や学生の重要なカルシウム源になっていることも注目する。



木村美恵子, 糸川嘉則ほか: 日本公衆衛生誌, 31, 608 (1984)

図4 児童、生徒、学生のカルシウム充足率 (カルシウム摂取量/カルシウム所要量)

このようなカルシウム摂取不足はわが国の栄養上の問題点のひとつである。実際に高齢者の間に骨粗鬆症の患者が増加しており深刻な問題となっている。骨粗鬆症に罹患するのは経産婦に多いが、前述のように若い女性のカルシウム摂取量が低いのは問題である。高齢になるとカルシウムの腸管からの吸収が悪くなるので、老年期に備えて若い時代に十分なカルシウムを摂り強い骨をつくっておくことが骨粗鬆症の予防対策となる。

表4に各種食品中のカルシウム含有量をしめす。骨と一緒に食べる小魚類、乳製品、海藻類、緑食野菜にカルシウムは多く含まれている。平成3年度の国民栄養調査で食品群別カルシウム摂取の状況を見ると動物性食品から44%, 植物性食品から56%摂っている。食品では乳類がもっとも多く27%, ついで豆類が16%, 魚介類が13%, 黄緑色野菜が8%, そのほかの野菜が10%と主要なカルシウム源となっている。

3 マグネシウム

組織中のマグネシウム濃度は表1にしめされている。身体中のマグネシウムのうち骨のなかに50-60%含まれており、筋肉中が20%である。マグネシウムについても骨が貯蔵庫となっており、マグネシウムが

表4 食品中のカルシウム含有量

食品	カルシウム (mg/100g)
皮つき干しえび	2,300
煮干し	2,200
干しひじき	1,400
脱脂粉乳	1,100
番茶	740
素干し昆布	710
チーズ	660
唐辛子(葉)	640
しらす干し	530
あゆ	370
大豆	240
かぶ(葉)	230
豆腐	120
牛乳	100
鶏卵	55
母乳	27
牛肉	5
玄米	4
番茶(浸出液)	2
精白米	2

[資料] 四訂日本食品成分表

欠乏すると骨からマグネシウムが遊離され利用される。副甲状腺ホルモンは骨からマグネシウムの遊離を調節する作用を有すると考えられる。しかし、マグネシウム欠乏はつねにカルシウム代謝に影響をおよぼし、副甲状腺ホルモンはカルシウム代謝により敏感であるから、単独のマグネシウム代謝に対する作用を見いだすことはきわめて困難である。

食物から摂られたマグネシウムは1日に25mgの低マグネシウム食では75%, 600mgという高マグネシウム食では25%が吸収されるという報告がある。通常の食事では30-50%程度しか吸収されないと推測される。マグネシウムの吸収はビタミンDにより促進され、カルシウム、リンによっては阻害される。カルシウムはマグネシウムと同じ輸送蛋白質を必要とし、そこで拮抗阻害をおこなうのではないかという説もある。

腎臓はマグネシウム代謝調節に関与するもっとも重

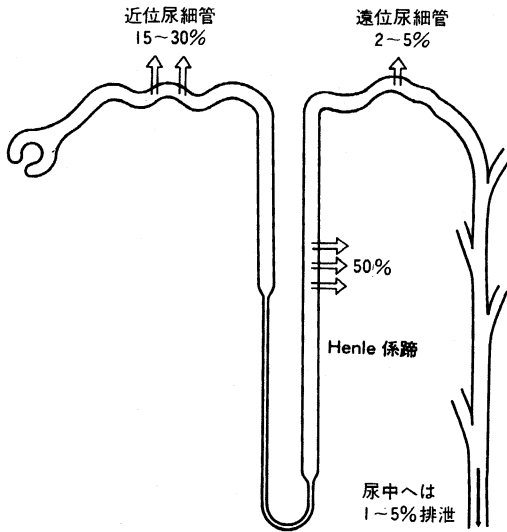
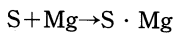


図5 腎臓、ネフロンにおけるマグネシウムの再吸収

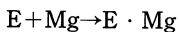
要な臓器である。1日のマグネシウム摂取量の3-10倍程度の1-3gのマグネシウムが毎日糸球体から濾過されるといわれている。そして、尿細管による再吸収は図5にしめすように、ヘンレ係蹄で50%、近位尿細管で15-30%、遠位尿細管で2-5%が吸収され、尿中に排泄されるのは1-5%程度である。このことは腎臓機能障害が起るとマグネシウムの排泄障害が発生し、高マグネシウム血症となり神経や心臓の異常をきたす可能性をしめしている。

マグネシウムの生理作用として重要なのは300種以上の酵素が、その活性化にマグネシウムを必要とする点である。マグネシウムを必要とする酵素には、まず基質とマグネシウムが結合して反応が起きる第一群と、酵素とマグネシウムがさきに結合して反応が起きる第二群の二種類の酵素がある。そのおのおのを式に表わすとつぎのようになる(Mg: マグネシウム, S: 基質, E: 酵素, P: 生成物)。

第一群酵素



第二群酵素



この二群の酵素は共にマグネシウムがなければはたらかない。したがって、マグネシウムは生体内の300カ所以上の反応に関係しており、新陳代謝を調節していることができる。

ヒトの体内でエネルギー源となるもっとも重要な酵

表5 日本人青年女性におけるマグネシウムの出納実験

摂取量 (mg/日)	排出量		出納値 (mg)
	大便 (mg/日)	尿 (mg/日)	
160	82±15	70±16	+8
170	76±15	68±16	+26
220	110±21	52±10	+58
400	240±36	89±20	+71

鈴木, 西牟田: マグネシウム, 3, 7(1984)

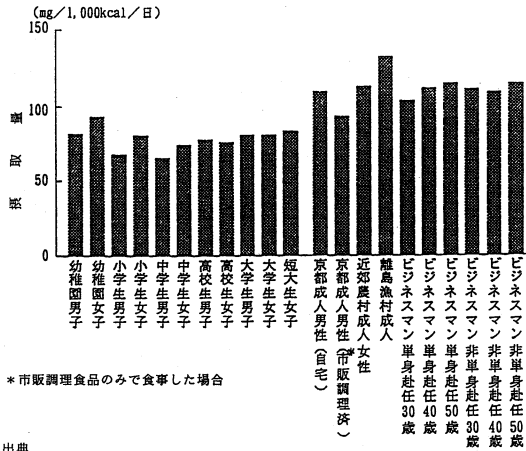
素であるATPaseはマグネシウムを必要とする酵素群の中の第1群酵素であり、まず基質のATPがマグネシウムと結合し、ついで酵素がはたらくのである。マグネシウムはこのようにエネルギーを産生する機構に密接に関与している。

また、マグネシウムは虚血性心疾患など循環器疾患を予防する作用を有することが明らかになってきた。その機構の詳細は明確にはなっていないが、マグネシウムが血管周囲の平滑筋細胞内へのカルシウムの流入を阻害し、血管の攣縮を防ぐためと考えられる。すなわち、医薬としてもちいられるカルシウム拮抗剤のような作用をもっている。

マグネシウムは体温や血圧の調節、神経の興奮、筋肉の収縮などの生理的機能に関与していることが知られている。これらの作用について明確な機構は判明していないが、前述の酵素作用に関連するものが多いと思われる。

マグネシウム欠乏の症状の主要なものは神経・精神障害と循環器障害である。神経症状としては神経過敏症、振戦(筋肉の不随意的なふるえ)、テタニー、クボスティック徴候(Chvostek phenomenon, 耳たぶと口角を結ぶ線の中点を叩くと眼の周囲と頬の筋肉が収縮する現象、神経の異常興奮をしめす徴候)などが認められる。精神症状は抑うつ症、妄想、不安感、興奮、錯乱などが見られる。循環器障害は不整脈で、期外収縮、頻脈、心室性細動が起こる。

しかし、このような症状はマグネシウム欠乏がかなり進行してから出現するものであるが、現在マグネシウムの欠乏症として注目されているのは、慢性的にマグネシウムが不足した場合に誘発されると考えられている虚血性心疾患など心臓血管の障害である。慢性的なマグネシウム欠乏が心臓血管の障害をもたらすことが多くの疫学的、実験的および臨床的研究で認められている。したがって、心臓疾患を予防するために日常



*市販調理食品のみで食事した場合

出典 Kimura M, Nagai K, Itokawa Y: Magnesium in Health and Disease (eds: Itokawa Y, Durlach J) 63, (1989)

図6 日本人各種階層のマグネシウム摂取量

の食生活でマグネシウムが不足しないような注意が必要である。

過剰量のマグネシウムが経口的に投与された場合、腸管からの吸収が抑制され、体内に取り込まれても過剰量は速やかに尿から排泄されるから、過剰症が発生することはまれである。しかし、注射など非経口的に過剰に投与された場合、悪心、嘔吐、筋力低下、血圧低下が起り、深部腱反射が減弱、消失する。さらに呼吸の麻痺が起り、血清濃度が非常に高くなると心臓停止が発生する。治療法としてはカルシウムの静脈注射が有効である。大量の輸液ももちいられる。

マグネシウムの必要量については鈴木と西牟田が18-22歳の日本人青年女子を対象に、日常食に近い試験食を食べさせて8-9日間出納試験を行なった。この研究の結果は表5にしめすように、1日160mgのマグネシウム摂取量では尿と大便からのマグネシウム排出量とはほぼ等しくなり、この付近が日本人青年女子の平衡維持量であると考察している。この数値に日本人青年女子の平均体重を適用すると3.1mg/kg/日となる。成人男子の平均体重にこの数値を適用すると1日、200mgになる。また、本研究ではマグネシウム摂取量を増加させても尿中マグネシウム排泄量は増加せず、大便中のマグネシウム量が増加することから、腸管からのマグネシウムの吸収に限界があり、それが調節因子となっているであろうと考察されている。

マグネシウムの必要量はこの最少必要量に個人のばらつきなどによる安全率を加えて算出することにな

表6 食品中マグネシウム含有量

あおのり(素干し)	1、300
米糠	1、000
干し昆布	700
ココア	440
ごま	360
アーモンド	290
大豆	220
玄米	110
豆腐(にがり使用)	85
ほうれんそう	70
白米めし	40
いわし	34
白米	33
豆腐	32
食パン	20
牛肉	16
大根	16
牛乳	10
鶏卵	10
母乳	3
茶(浸出液)	0

日本食品無機質成分表

る。今回厚生省よりだされたマグネシウムの目標摂取量が1日に300mgとされたのは、これら出納試験の成績からみて妥当な線であると思われる。

世界各国の成人のマグネシウム所要量は国によってかなりばらつきがあり、ソビエトは500mg/日と高い値を設定しているが、カナダは250mg/日と比較的低い値を設定している。そのほかの国ではその中間である。

種々な食事調査によると日本人成人のマグネシウム摂取量は150-300mgの範囲に入るようである。前述のマグネシウム目標摂取量は300mgであるから、一般にマグネシウムの摂取は十分でないと思われる。

図6は種々な階層の1日のマグネシウムの摂取量を摂取エネルギー1000kcal当たりに見たものである。年齢別では年齢の若い層はマグネシウム摂取量が低く、とくに小学生と中学生の男児が低値であっ

た。成人では都会より農漁村のほうがマグネシウム摂取量が高い傾向がある。日本型食生活といえる穀物類、野菜類などの植物性食品の多い食パターンではマグネシウム摂取量が多くなるが、肉類を中心とした欧米型食パターンではマグネシウム摂取量が低くなる。これらの結果を見ると成長期でマグネシウム不足にならないような注意がもっとも必要ようである。

表6に種々な食品中のマグネシウム含有量をしめす。穀物類では米、麦などの玄穀にはマグネシウムが豊富に含まれているが、これが粉に挽かれたり、加工、調理、精白などで手が加えられるにつれてマグネシウム量は低下する。種実類は一般に良いマグネシウム源で、この種の食品を多く摂るようにすると、マグネシウム摂取量は増加する。魚介類はまずまずのマグネシウム源であるが、肉類、鶏卵のマグネシウム含有量は低い。乳類はすぐれたカルシウム源であることが知られているが、マグネシウム源としてはあまり期待できない。野菜類のマグネシウム含有量にはばらつきがあるが、摂取量が多いのでマグネシウム源の重要な

もののひとつである。果実類、きのこ類もマグネシウム含有量は多くない。海藻類はマグネシウムの豊富な食品である。菓子類、嗜好飲料類、調理香辛料類もマグネシウム源として無視できない。茶、コーヒーなどは葉や豆にはマグネシウムが多く含まれているが、浸出液にはほとんどでてこない。抹茶、ココア、インスタントコーヒーのように粉をそのままちいるものは良いマグネシウム源となる。

文 献

- 1) 最新栄養学建白書, 333 (1987).

筆者紹介

糸川嘉則 京都大学大学院医学研究科教授 医学博士
昭和34年京都大学医学部卒業、同35年京都大学医学部助手、講師、助教授をへて昭和54年京都大学医学部教授、平成5年大学院大学化により京都大学大学院医学研究科教授(名称変更)。

連絡先 〒606-01 京都市左京区吉田近衛町(勤務先)

(1994. 4.27受付)
(1994. 5. 9受理)

—— 第11回セラミック・セミナー参加募集 ——

オプトエレクトロニクス特集

主 催：(社)日本セラミックス協会行事企画委員会

協 賛：石膏石灰学会ほか

日 時：1994年11月24日(木)～25日(金) 9：30～16：30

場 所：社団法人 日本セラミックス協会 3F 会議室

〒169 東京都新宿区百人町2-22-17 Tel. 03-3362-5232

参加費：会員(協賛学協会員を含む)20,000円、非会員30,000円、学生会員10,000円(消費税込)

定 員：50名

申込方法：氏名、勤務先名、部署、所在地、および電話番号を明記の上、銀行振込(申込書は郵送またはFAX)または現金書留(申込書同封)にて申込下さい。お申込後の取り消しによる返金は致しません。

申込先：〒169 東京都新宿区百人町2-22-17

(社)日本セラミックス協会セラミック・セミナー係

Tel. 03-3362-5232 Fax. 03-3362-5714

振込先：第一勧業銀行大久保支店(普)1116698 (社)日本セラミックス協会名義

振込の場合は請求書、領収書は発行致しません。