

アルミニウムがつくる新時代

ALUMINIUM+UTOPIA=ALUTOPIA

特集：この魅力なる金属 Al & Mg

創刊40周年記念号

アルミニウムの総合雑誌

アルトピア

10

VOL.40 NO.10

OCT. 2010

原子番号13番, アルミニウムには
未来が埋蔵されている。

1																	18		
1	1															2			
1	H															He			
2	3	4												5	6	7	8	9	10
2	Li	Be												B	C	N	O	F	Ne
3	11	12										13	14	15	16	17	18		
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56		72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
6	Cs	Ba	*1	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88		104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116		118	
7	Fr	Ra	*2	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh		Uuo	

*1:Lanthanoid

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

*2:Actinoid

地球環境とマグネシウム

The Environmental Issues for Magnesium Future

井 藤 忠 男	*1	Tadao Ito
出 口 剛 太	*2	Gota Deguchi
大 賀 光太郎	*3	Kotaro Ohga
上 杉 浩 之	*4	Hiroshi Uesugi
杉 山 喬	*4	Takashi Sugiyama
中津川 勲	*5	Isao Nakatsugawa
日比野 泰 雄	*6	Yasuo Hibino

低炭素（脱石油・石炭）社会への大転換期に突入した 21 世紀初頭の現在、かつてないほどに地球環境に負荷の少ない循環型の軽量素材・軽量技術が求められている（3R）。軽量エコマテリアルとしての期待が高いマグネシウム素材を一層進化するため地球環境保全関連（LCA）日本開発技術（Mg 精錬工程 CO₂ 削減／水素キャリア MgH₂/SF₆ 代替ガス）を紹介し、今後の Mg 材料の利用・普及のあり方を展望した。

1. はじめに

1996 年 6 月、第 53 回 IMA（国際マグネシウム協会）国際会議日本大会（山口県宇部市）において、地球環境にやさしい 21 世紀型のエコマテリアル（3R）としてのマグネシウムへの期待が提言された（SONY 基調講演¹⁾）。

そして 2000 年 5 月、バンクーバー（カナダ）で開催された IMA 国際会議で日本における IT 関連機器（日本開発商品である軽薄短小化を目的としたノート型 PC、携帯電話などのデジタル通

信情報機器）のマグネシウム部品開発と量産化の多くの実際例が報告された²⁾。その後、これらのダイカスト、Thixo 法などの生産技術（薄肉化）と大量生産の舞台は台湾、そして中国へと現在に至る。

一方、欧米においては大型車の軽量化ニーズ（燃費向上）の高まりにより、パワートレインおよびコックピット部品への Mg 合金ダイカスト開発と採用が相次いだ。それゆえ、それまでのマグネシウムの用途はアルミニウム合金元素としての添加剤が大半であったが、今や構造用材料への利用が用途分野トップ（使用重量）の地位を確立している。

日本のマグネシウム合金の自動車（4 輪車³⁾、2 輪車⁴⁾）への部品応用は地道な長い開発歴史があ

*1 Foxconn Technology Co., Ltd. (鴻海 Gr./Hon Hai Gr.)

*2 NPO 法人地下資源イノベーションネットワーク

*3 北海道大学大学院工学研究科

*4 バイオコーク技研(株)

*5 富士工業(株)

*6 セントラル硝子(株)

るが、高価格がゆえに高級車種での採用が多く量的には限られていた。しかし、高品質のマグネシウム「ものづくり」要素技術は先駆的進化を遂げ現在に至っている（高品質ダイカスト技術⁵⁾、耐熱合金ダイカスト部品量産技術⁶⁾、環境配慮型表面処理技術⁷⁾）。

以上のマグネシウム部品生産技術は鑄造高圧高速射出複雑成形法であるダイカスト法が中心であるが、近年日本において塑性加工技術（DC 鑄造法、押出、板製造）開発も活発化した。特に連続鑄造圧延技術を含む板生産技術の進展は目覚ましい。

他方、近年においてマグネシウム原材料の精練は欧米でのダウケミカル、ノルスクヒドロを中心とした電解法から、中国でのドロマイトを原料とした安価なピジョン法（熱還元法）へと急速にシフトし、今や世界の8割以上が中国生産となった。また、中国はマグネシウム技術と応用の R&D を国策として展開し、「マグネシウム資源大国」から加工付加価値を指向した「マグネシウム工業大国」へと変貌を遂げつつあり、巨大な潜在的市場を背景に、その成長ぶりは驚嘆すべきものがある⁸⁾。

しかし、低炭素時代にふさわしい地球環境配慮・循環型 Eco-Material (3R) として普及するためには、LCA (Life Cycle Assessment) 問題、すなわちピジョンプロセスにおける CO₂ 排出削減およびマグネシウム溶解、鑄造時の防燃不活性ガス SF₆（地球温暖化係数 GWP は CO₂ の約 23,000 倍）の未使用を実現することなどが至急の問題解決環境課題となっている。

マグネシウムは地球上に豊富に存在し、リサイクルも容易な軽量材料として、これからますます、電気自動車などに代表される低炭素型時代の中で Eco-Material としてふさわしい用途・利用・普及が期待されている。さらに、マグネシウム独特の機能に着目した科学技術開発（エネルギー／燃料、電池開発、医療用生体吸収性合金など）も進展し、今後が大いに注目されている。また、新

しい強化機構による高強度合金、耐熱合金などのマグネシウム材料の R&D も深化中である。

マグネシウム技術の革新も課題解決もそれぞれ各国の人智を生かした国際的協業展開が必要（一部開始）であり、その努力が 21 世紀 Eco 材料への進化の早道となろう。

本報では日本で研究開発、または応用提案された地球環境関連と Mg 技術（CO₂ ガスの炭層固定化と炭層メタンガスの利用 CBM：ピジョン法への適用、水素貯蔵合金の開発と製造技術、SF₆ 代替ガスの開発と実用化）の現状および今後の方向性について総括し、日本発マグネシウム関連先端技術の一端を紹介するとともに、マグネシウム産業の地球環境に対する問題解決の一助となれば幸いである。（井藤忠男）

2. 中国マグネシウム精練ピジョンプロセスにおける CO₂ 排出削減対策

2-1 中国におけるマグネシウム精練の現状と CO₂ 排出

中国の 2007 年の一次マグネシウム (Mg) 生産量は 66 万ト⁹⁾であり、これは世界の生産量の約 80%にも達している。また、中国国内の Mg 精練メーカー上位 10 社のうち 7 社は山西省にあり、山西省の一次 Mg 生産量は中国全体の 80%に達する⁹⁾。

中国では、ピジョンプロセス（図 2.1）による Mg 精練が多い。原料には主にドロマイトが用いられ、始めに粉砕したドロマイトを焼成することで MgO を得る。さらにこの MgO を珪石、石炭、鉄から作られるフェロシリコン (FeSi₂) を還元剤として真空中で加熱することで一次 Mg が得られる。これら各工程では熱エネルギー源として安価な石炭が用いられることが多く、その燃焼により大量の CO₂ を排出している。

図 2.2 は石炭を燃料に用いるピジョンプロセスの LCA の結果¹⁰⁾で、エネルギーバランス（左）と CO₂ 排出源単位（右）を表している。同図に

よると、一次 Mg 1kg あたり合計 47kg の CO₂ が排出されるが、還元工程で 17kg、フェロシリコン (FeSi) 製造工程で 14kg、焼成工程で 13kg の排出であり、これら 3 つの工程から排出される CO₂ は全体の 94% に達する。焼成工程では図 2.1 の 1 式で明らかのように、非エネルギー起源の CO₂ も排出される。この量は、Mg/Ca 比が 1 であるドロマイトの場合、生産されるマグネシウム 1kg あたり 3.6kg¹¹⁾ となるが、この量は焼成工程の 13kg に含まれている。

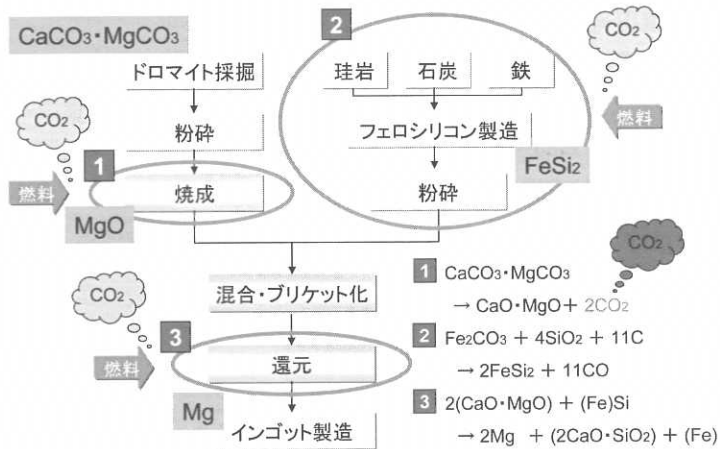


図 2.1 ピジョンプロセスによる Mg 精錬工程¹⁰⁾

2-2 ピジョンプロセスへの炭層メタン利用と CO₂ 削減

地球温暖化防止対策の一つとして、CO₂ の回収・貯留技術 (CCS; Carbon Dioxide Capture and Storage) が注目を集めている。この技術は、火力発電所や化学プラントなどの大規模排出源で CO₂ を分離・回収し、その CO₂ を地中や海底下などの貯留に適した場所まで輸送して、長期間にわたり貯留・隔離する技術である。現在、地中貯留と海洋貯留が検討されているが、地中貯留に関しては既に一部の国で商業ベースの貯留が始まっており、また多くのパイロット試験が世界各国で実施されている。地中貯留が可能な場所として、枯渇した油田や天然ガス田、帯水層、あるいは将来採掘しない石炭層などが有望視されている (図 2.3)。ちなみに IPCC の特別報告書¹²⁾ では、地中貯留のポテンシャルは全世界で約 2,000Gt (世界の CO₂ 排出量の 80 年分) と見積もられている。

CCS の一つの選択肢である石炭層への貯留は、石炭マトリックス内部表面への CO₂ 吸着現象を利用するため安定した固定が可能で、同時に炭層中に含まれるメタンガス (CBM) の回収も可能であり、付加的なエネルギー生産が可能になる点では他の貯留方法に比べるとメリットが大きい。

Energy Balance
537MJ/kg-Mg

GHG Balance
47kg-CO₂/kg-Mg

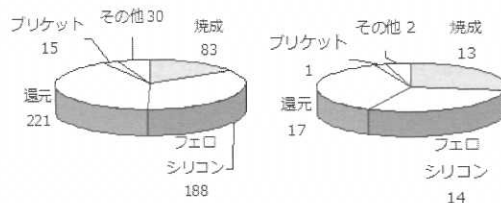


図 2.2 ピジョンプロセスの LCA (石炭使用ケース)¹⁰⁾

CBM の開発は既にアメリカや豪州などで実用化された技術で、生産された CBM は発電や代替天然ガスとして幅広く利用されている。CBM の開発に併せて CO₂ を炭層に注入・固定することで、CBM 回収率の向上が期待され (CO₂-ECBM)、多くのパイロット試験が既に実施されている。

一方で、中国の CBM 開発と利用に関する 11 次 5 年計画 (2006) では、2006 年の CBM 生産量 250Mm³ (百万 m³) を 2010 年には約 20 倍の 5,000Mm³ にまで大幅に引き上げることが目標として掲げられている。この増産の大部分 (約 80%) は山西省 (沁水炭田とオルドス炭田) での CBM 開発が占める計画である。従って、Mg 精錬が集中する中国山西省においては、ピジョンプロセスのエネルギー源として CBM が利用できる、あるいは CCS と組み合わせた CO₂-ECBM が適用できる可能性は高い。

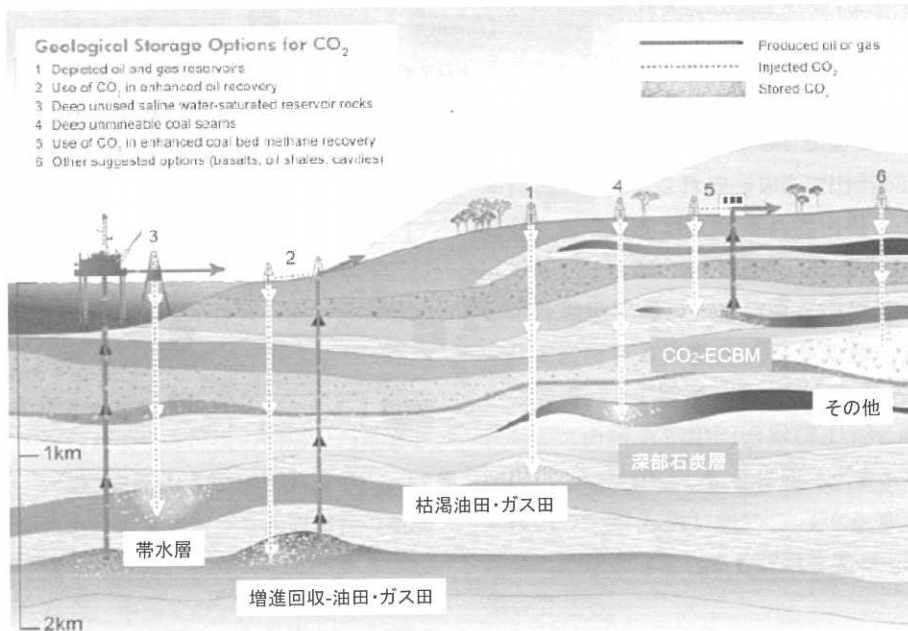


図 2.3 地中貯留の有望地層

2-3 ピジョンプロセスへの CO₂-ECBM 適用試算

想定したモデルケースは年産1万トンの Mg 精錬プラントで、操業年数は15年、年間稼働率は95%とした。このモデルケースで、石炭を燃料とする場合に1年間に排出される CO₂ 及び消費されるエネルギーは、図 2.2 の LCA の結果から表 2.1 のようである。

ここでは、表 2.1 のその他を除くプロセスで消費されるエネルギー供給源を全て CBM に置き換える場合（燃料転換）と、転換した CBM の燃焼により排出される CO₂ を分離・回収して炭層に圧入・固定（焼成工程で発生する非エネルギー起源の CO₂ は濃度が高いため直接炭層に圧入）する場合（CCS 併用 CO₂-ECBM）の2つのケースについて CO₂ 削減効果を試算した。また、参考ケースとして、燃料はそのまま石炭を使用するが、非エネルギー起源の高濃度 CO₂ のみをそのまま炭層に圧入し、それにより回収できる CBM を一部の石炭の代替燃料とするケースについても試算した。

表 2.2 は山西省の代表的な CBM 鉱区に関する

表 2.1 モデルケースの CO₂ 排出とエネルギー

プロセス	CO ₂ 排出量 t-CO ₂ /y	エネルギー GJ/y
Fe-Si 生産	140,000	1,880,000
ドロマイト焼成 (非エネルギー起源)	130,000 (40,000)	830,000 (0)
Mg 還元	170,000	2,210,000
ブリケット化	10,000	150,000
その他	20,000	300,000
合計	470,000	5,370,000

表 2.2 CBM に関する基本条件

項目	単位	数値
CBM 埋蔵量	Mm ³ /km ²	200
CBM 回収量 (15年)	Mm ³ /km ²	100
〃 (CO ₂ -ECBM)	Mm ³ /km ²	150
CO ₂ -ECBM 増産率	%	50
最大 CO ₂ 貯留量	t-CO ₂ /km ²	450,000

諸データ¹³⁾である。表 2.2 では、通常の方法により、15年間で CBM 埋蔵量の 50%まで、CO₂-ECBM を採用すれば 75%まで回収でき、また CBM は 1.5 倍の量の CO₂ と置換される (CO₂/CH₄ 吸着比=1.5) と仮定している。

(1) 供給 CBM 量の計算

燃料転換ケースでは、必要な熱量 (5,070,000GJ/y) を賄うための CBM 供給量は、CBM の熱エネルギーを 40MJ/m³ として計算すると年間 127Mm³ となる。さらに、CBM を生産・配送するエネルギーは全 CBM 生産量の 10% を利用するガス発電により賄うとすると、必要な CBM 生産量は年間 140Mm³ となる。

CO₂ を分離・回収・貯留するケースでは、さらに CO₂ の分離・回収設備と圧入設備にエネルギーが必要であるが、これも CBM 生産量の 20% を利用するガス発電により賄うと仮定すると、必要な CBM 量は年間 165Mm³ となる。また、電力以外に分離・回収設備で利用する熱エネルギーは廃熱を利用することを前提としている。

(2) CO₂ 排出量の計算

燃料転換ケースでは、CBM の燃焼による CO₂ 排出量は、CBM 総供給熱量 (40MJ/m³ × 140 Mm³) に IPCC¹⁴⁾ の天然ガスの排出係数 (56.1 kg-CO₂/GJ) を掛け合わせて、約 31 万トンである。この量にドロマイトの焼成工程で排出される非エ

ネルギー起源の CO₂ とその他の CO₂ 排出量を加え、合計排出量は年間 37 万トンとなり、削減量は 10 万トンである (削減率約 21%)。

CCS 併用ケースでは、分離・回収効率を 90% と仮定すると年間 165Mm³ の CBM 燃焼に起因する CO₂ (37 万トン/y) のうち 33 万トンと非エネルギー起源の CO₂ (4 万トン/y) が炭層内に固定される。その結果、排出される CO₂ はその他の 2 万トンを加えた 6 万トンであり、削減量は 41 万トンとなる (削減率約 87%)。

石炭燃料を継続使用し、非エネルギー起源の CO₂ のみを炭層に圧入するケースでは、年間 15Mm³ の CBM が回収され、そのうち 12Mm³ (80%) を石炭代替燃料として利用できる。これにより削減できる CO₂ 排出量は年間約 1 万トンであり、炭層に固定した非エネルギー起源の CO₂ と併せて約 5 万トンの削減 (削減率約 11%) になる。

図 2.4 には、その他工程を除く全ての工程に CCS を併用した場合の CBM 利用 Mg 精錬工程と、CBM 生産量、消費量、および CO₂ 収支を示

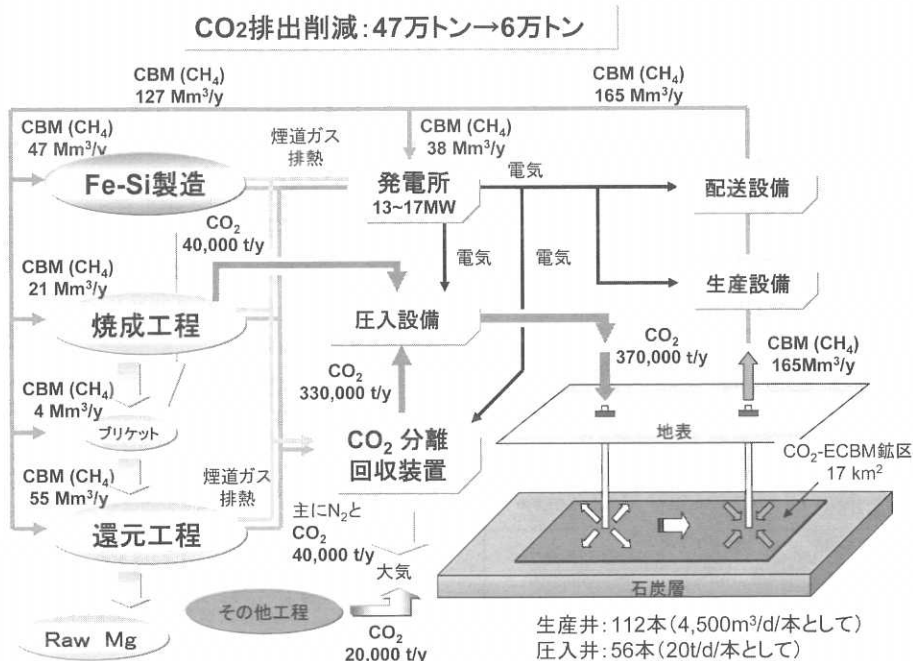


図 2.4 CCS を適用した CBM 利用 Mg 精錬主要工程

す。

2-4 ピジョンプロセスへの CO₂-ECBM 適用に向けて

以上の試算は、あくまで石炭から CBM への燃料転換や CO₂-ECBM 適用の可能性を示唆するもので、今後、これらの技術を具体化していくためには、現地調査、シミュレーション、パイロット試験、経済性評価など様々な作業が必要である。しかしながら、このような技術開発が Mg 精練の低炭素化に果す役割は大きいと考えられる。

(出口剛太、大賀光太郎)

3. MgH₂ 水素貯蔵材料の開発と実用化

3-1 エネルギーキャリアとしての MgH₂

CO₂ 排出による地球温暖化や化石燃料枯渇への危惧を背景に、水素エネルギーへの関心が高まっている。水素エネルギーを有効に、かつ世界規模で利用するためには、安全・高密度で水素を貯蔵・輸送できる安価な水素貯蔵媒体の開発が必須である。表 3.1 に代表的な金属水素化物の特性を示す。マグネシウム系水素貯蔵材料は、①水素貯蔵量が最大 7.6mass% と高い、②原材料は地殻や海水中にほぼ無尽蔵に存在し、世界中で生産・利用できる、③大気中では安定で安全な物質である、等の利点を備えている。他方、(i) 反応速度が遅く、水素放出にも 300°C 程度の高温が必要、(ii) 表面の酸化物皮膜で覆われるため、活性化処理等の予備処理が必要、などが実用化を阻んでいる。さ

表 3.1 代表的な金属水素化物の特性

	カーボンナノチューブ	有機ハイドライド	無機ハイドライド	水素貯蔵合金	
				LaNi ₅ 系	Mg系
水素貯蔵濃度 (wt%)	2-8	5.8-7.3	7.4-8.7	1.5	7.6
水素放出温度 (°C)	極低温～常温	300<	200<	常温	300<
原料コスト	高い	安い	高い	高い	安い
コメント	量産性低い	毒性、難分解性	水素再吸蔵量低下	希土類元素	自然界に豊富

らに、高純度 MgH₂ を安定に量産する技術は知られていない。我々はエネルギーキャリアとしての MgH₂ の可能性に注目し、熱的平衡法に基づく MgH₂ の製造、加水分解反応を利用した水素製造、さらにこれら技術に基づく製品開発を進めている。

3-2 MgH₂ の製造法

MgH₂ の製造法としては、有機 Mg 化合物の熱分解による合成やマグネシウムと水素を直接反応が知られている。前者は得られる MgH₂ の反応性が高く、取り扱いが難しい。北海道大学の秋山研究室は、燃焼合成法¹⁵⁾、HCVD¹⁶⁾、および熱的平衡法¹⁷⁾ による MgH₂ の直接製造法を開発している。我々は、秋山研究室と共同で熱的平衡法を利用した MgH₂ の量産技術を開発している^{18,19)}。

本開発技術の原理は、図 3.1 に示す水素雰囲気下でのマグネシウムと MgH₂ の平衡状態図により説明できる。原料を水素雰囲気中に保持し、温度及び圧力をマグネシウムと水素とが熱力学的に安定に共存する領域 (I) と、MgH₂ が熱力学的に安定に存在する領域 (II) とを往復させることで、低コスト・高収率で MgH₂ を製造する。実用炉の設計ならびに操業技術の開発は 2006 年から検討を開始し、実験炉 (20g/バッチ)、2 号炉 (5kg/バッチ) を経て、現在 3 号炉 (50kg/バッチ) による量産検証が進んでいる。粒状 MgH₂ に加え、利便性とコストダウンを図ったタブレット MgH₂ も供給可能である。水素化率 (純度)

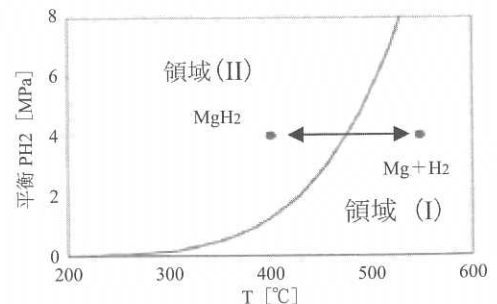


図 3.1 MgH₂ と (Mg+H₂) の平衡状態図

は概ね 95%以上を示す。

3-3 MgH₂の加水分解による水素生成

MgH₂から熱的に水素を放出する場合、300℃以上の高温が必要である。この問題をクリアするため、 $Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + 2H_2$ に示される加水分解反応を用いて、100℃以下で水素を取り出すプロセスに注目した。現在、MgH₂粒の微細化、酸の添加ならびに超音波照射による反応性の向上に取り組んでいる。

3-4 マグ水素リアクターの開発とその適用例

MgH₂の加水分解を利用した水素をオンデマンドに供給するマグ水素リアクターの開発を行っている。100~2000ml/min.の定量の水素を生成し、燃料電池をはじめとする水素供給源に利用できる。加水分解には10~20wt%のクエン酸溶液を使用する。

これまで、パートナー企業・大学との共同研究を行いながら以下の製品への適用に取り組んでいる。

【教育用キット】中・高校の教育現場では、水素を燃料として利用する燃料電池を用いた実験のニーズが高まっている。教育用燃料電池システムの試作品を図3.2に示す。

【ポータブルマグ水素電源（非常用電源）】長期の保管が可能なカートリッジ型MgH₂燃料を燃料電池と組み合わせた簡便な発電システムを開発している。

【清掃用マグ水素ブロアー、芝刈り機】これら機器の使用に伴う騒音、振動、炭酸ガスの排出等の問題が急激に顕在化している。専門メーカーと共同開発を実施中である。

【マグ水素通勤用バイク】都市交通の混雑解消策としての一人乗り用バイク、高齢化社会に伴う歩行困難者用バイクを開発中である。マグ水素リアクター、燃料電池を組み込んだスズキセニアカーの走行実験の状況を図3.3に示す。

3-5 生成物の再利用・再生

MgH₂の加水分解より生じたMg(OH)₂や脱水したMgOの再利用・再生の研究についても我々は積極的に取り組んでいる。

【MgO/Mg(OH)₂の再利用】MgOは化学薬品として重要な位置を占めており、全世界の使用量は年間数千万トンに及ぶ。具体的にはモルタル添加剤、薬剤（緩下剤等）、耐熱レンガ、プラスチック、合成樹脂等への添加剤などが知られている。Mg(OH)₂やMgOはCO₂と反応して炭酸塩を生成するため、CO₂の固定剤としても注目されている。

【Mg/MgH₂への再生】工業的なマグネシウムの生産方法である無水MgCl₂の電解精錬、もしくはFeSi触媒を添加した熱還元法が再生技術に転用できる。固体酸化物酸素イオン電導膜を用いた電解精錬や太陽光励起レーザーによるマグネシウムへの還元方法も提案されている。弊社は、水素プラズマ炉によるMgH₂への直接還元プロセ



図 3.2 教育用燃料電池システム

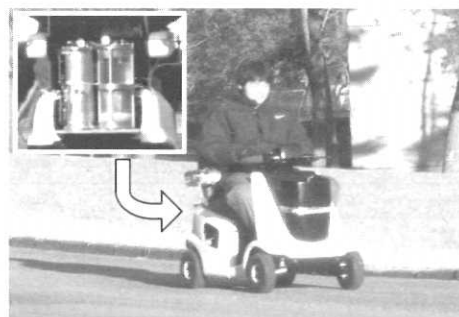


図 3.3 歩行困難者用マグ水素電動椅子（スズキ セニアカー）への搭載

スに取り組んでいる。

3-6 展望

MgH₂は安定した化合物であり、消防法の危険物に相当しないことから、安全に輸送・貯蔵・使用が可能である。高密度の水素キャリアとして機能し、これからのクリーンエネルギー社会での活躍が期待される。地球環境を保全しつつ安全・経済的・快適なエネルギーの地産地消社会の実現に貢献したい。(上杉浩之、杉山喬、中津川勲)

4. SF₆代替ガスの開発と実用化

(地球温暖化係数の極めて高いSF₆の削減)

4-1 代替ガスの開発

マグネシウム合金鋳造用の防燃ガスに要求される性能としては、地球温暖化係数(GWP)が低いこと、低毒性に加えて樹脂、ゴム、金属材料等に対する材料適合性、適度な沸点、熱分解性等がある。これまで広汎に用いられてきたSF₆に代わり、GWPを下げる目的でAMカバー(HFC-134a)やMGシールド(Novec-612)等が開発された。これらの物質に続き、NEDO技術開発機構の「マグネシウムカバーガス用SF₆排出削減に関する調査研究」事業における長岡技術科学大学²⁰⁾の基礎評価や(株)アーレスティ²¹⁾等の実機試

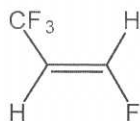


図 4.1 トランス-1,3,3,3-テトラフルオロプロペン

表 4.1 ZEM-SCREENの主な特性

	ZEM-SCREEN	SF ₆
GWP100	9	23900
分子量	114	146
分子中のF含量 (mass%)	0.67	0.78
蒸気圧 (MPa; 25°C)	0.51	2.31
毒性	低	低
燃焼性	微燃	不燃

験による高い評価を受け、セントラル硝子(株)は、防燃性ととも環境を配慮した新規防燃ガスとしてトランス-1, 3, 3, 3-テトラフルオロプロペン(商品名: ZEM-SCREEN)を2009年4月に企業化した。

4-2 実用化

ZEM-SCREENは分子中に2重結合を有するため大気圏中のOHラジカルとの反応性が高く(低GWP)、なおかつ低毒性、低沸点のガスであり取り扱いが容易である。また、この2重結合によりCF₃基が活性化されていることから、フッ素原子と金属マグネシウムとの反応性が高まり、溶湯表面で防燃皮膜(MgF₂等)が迅速に形成される。

ZEM-SCREENはSF₆に対し、そのGWPが1/2600以下と極めて低く、地球温暖化に及ぼす影響は著しく小さい。本物質の熱分解温度は比較的高く(600~800°C)、マグネシウム合金の溶湯温度に合致した熱分解挙動を示す。そのため、キャリアガスとして経済的かつGWPゼロの窒素を用いた場合にも安定した防燃効果を得ることができる。ただし、ZEM-SCREENを高濃度で用いた場合、過剰のフッ化水素が生成し、雰囲気中の水分とともに溶解炉等の腐食を引き起こすことがある。このため、適正な濃度、流量で使用することが望ましい。また、高圧ガス保安法では可燃性の液化ガスに分類されるが(ASHRAE法準拠では不燃)、キャリアガスと一旦混合したガスは不燃かつ凝縮し難くなり、混合ガス設備以降は基本的にSF₆と同様に取り扱うことができる。

NEDO技術開発機構の成果に基づき、セントラル硝子(株)は日本マグネシウム協会加盟のダイカスター等へZEM-SCREENの紹介ならびに実機試験に取り組んできた。現状加盟過半数の企業で採用済み、採用予定または検討中である。

4-3 今後の見通し

わが国のマグネシウム合金鋳造品の需要は、軽

量化を目的とした自動車関連部品等を中心に拡大している。それとともにマグネシウム合金製造に用いられる防燃ガスの需要は、長期的に増加することが予想されている。防燃ガス原単位の改善に加え、経済環境の変化に伴う国内マグネシウム産業の海外進出や海外企業の成長等を考慮すると、今後海外での防燃ガスの需要がさらに高まることが予想される。特に、近年マグネシウム資源を有している中国でのマグネシウム合金鋳造産業の進展は目覚しく、それに比例して防燃ガスであるSF₆やSO₂の需要も急速に増加しており、世界的な地球環境保護の観点から安全でGWPの低い物質への速やかな切り替えが望まれる。

(日比野泰雄)

5. おわりに

以上紹介された地球環境保全技術はいずれも日本で研究開発され実用化されつつあるマグネシウム関連環境技術であり、海外、特に中国（マグネシウム産業大国；膨大な操業現場と市場）に向けての具体的な技術移転が両国のマグネシウム産業における戦略的互惠関係構築を促進するものと期待されている。

来春1月に、東京ビッグサイトで「第1回クルマの軽量化技術展」が開催される。対象は素材・材料（高張力鋼板、軽金属、CFRP、樹脂系……）はもちろん、成形・加工技術・加工装置／部品・モジュール／設計技術／試験・計測・シュミュレーション技術などありとあらゆる軽量化技術が初めて一堂に集結する。

これは近年、CO₂の排出規制が強化される中、燃費向上、EVの走行距離の拡張のため、自動車メーカー・自動車部品メーカーが「クルマの軽量化」（電池搭載による車体重量問題を含めて）にしのぎを削っている証左でもある。

マグネシウムのクルマへの実用軽量材料としての期待は、これまでも高まった時期が何度もあった²²⁾。しかし、脱炭素（石油・石炭）社会を目指さざるを得ないクリーンエネルギー指向の地球

規模大テーマ「クルマの軽量化」必須の背景の中で材料置換期待（内容）は、これまでとは遥かに違う重要度があり、その市場ニーズ要求度の質・量は多岐、多量にわたり、厳しい競争下のものになるだろう。

いかにCS（Customer Satisfaction；顧客満足度）すなわち利用する側の要求度（品質、価格、技術、提案企画力、設計力、試作開発力、生産力、納期、情報力、地球環境貢献度：LCA／リサイクル／3R）にあらゆる課題でどれだけ答えられるかがマグネシウム部品採用のカギになる。

マグネシウム材料優位性の程度（費用対効果）は、魅力（付加価値）は？ 他素材・材料との競争力そして技術の国際競争力など相対的客観的評価、検証、吟味の中での厳しい競争が本格化する。

日本におけるマグネシウム関連「ものづくり」業界は、最近も続く厳しい経済状況のもとで収縮・閉塞状況にあり、永年培ってきた精緻（精密・精確）な生産要素技術の継続・革新が危ぶまれてさえいる。

上述したように石油／石炭の社会から脱炭素社会への時代の転換期に突入した今まさに地球環境にやさしい「軽量素材」が求められる。千歳一遇のチャンス到来！（ピンチはチャンス）。勘違いしてはいけない。競合材料にも全てビッグチャンスである（チャンスの裏にピンチあり）。禰を締め直していま一度「壁」（採用阻害要因）に立ち向かう覚悟（情熱）と認識（冷徹）が必要であり、しっかりした市場ニーズ（質・量）を見据えた短期、中長期戦略のもと、問題課題解決型 All Japan Magnesium Team（志の「絆」で結ばれた各専門家集団）のスピード感あふれた展開が切望される。（WBC、FIFAワールドカップの話ではない）

以上の構造用軽金属（含む：防音／防振：Damping 減衰能）としての特性の他に、水素貯蔵性、電気化学的特性、燃料高エネルギー性、人体での必須元素・安全性などに着目したR&Dが進展し、クリーンエネルギー水素の利用と一次、

二次電池への応用など脱炭素社会実現に向けての極めて重要な安全物質（含む：脱リチウムイオン電池）としての可能性が注目される。

最近韓国政府はマグネシウム金属を次世代軽量 Eco 材料 (Super-Light Magnesium) として選定し、マグネシウム関連課題に対して向こう 10 年にわたり年間 1,000 万ドルの資金提供を発表、また世界的製鉄鋼企業 Posco 社（新日鉄は 5% 上位株主）はマグネシウム板製造事業をさらに強化すると同時にピジョン法による国内精練に着手した。エコカー向けに韓国お家芸の素早い集中投資が素材産業そして生産財の国産化に向けて一気に走りだしている。

一方、前述した通り、中国の加工指向マグネシウム工業国としての成長は、潜在的巨大市場を背景にますます増大するだろうが、マグネシウム素材生産一極化に対してはグローバル地球経済市場のマグネシウム産業発展の観点から慎重な考慮が必要である（レアアース；希土類元素の場合、中国産出量 97%。今年度の日本への輸出枠約 4 割削減。HV 車、省エネ家電生産影響大）。また、北米では米国 (DOE, Big3)、カナダ (NRC)、中国 (MOST) 連携によるマグネシウム自動車部品 R&D プロジェクトが進行中であり、ドイツでは GKSS Mg Innovation Centre を中核とした RD コンソーシアムがマグネシウムによる自動車軽量化に向けて革新的な活動を展開中である。

海洋国家・日本には幸いなことに海水には無尽蔵なマグネシウムが眠っている。再生可能自然エネルギー（太陽光、風力、波力 etc.）を利用した海水からのマグネシウム精練を真剣に科学的、技術的、経済的、社会的（含む：海水の淡水化）、従って国家戦略的に人・智を尽くして検討すべき時に来ている（灯台下暗し）。21 世紀の地球は「新エネルギー」と「水」不足問題が最重要かつ緊急課題であり、マグネシウムは両方に直接的、間接的に関連する軽量金属である。ちなみに、Magnesium は中国語で「鎂」（メイ）と書くほどに美しい、魅力的な金属と言える。

16 世紀の国家学者（仏 Dr. ボタン）の格言「人間こそが唯一の“富”である」は、工業資源の乏しいがゆえの「科学技術立国」が国是である「NIPPON」のためにこそある。

“Boys be AMBITIOUS !! not for money or selfish aggrandizement, ... Where there is no VISION, the PEOPLE perish.”

—Dr. William S. Clark—

（井藤忠男）

《参考文献》

- 1) E. Ohshima and T. Ito : Proc. 53rd Ann. World Mg Conf., IMA, Japan, June (1996), 1-16
- 2) T. Ito and Y. Kojima, et al. : Proc. 57th Ann. World Mg Conf., IMA, Canada, May (2000).
- 3) 板倉浩二：軽金属, 60, (2010), 305-311.
- 4) 小池俊勝：金属, 80, No.8, (2010), 37-40.
- 5) T. Ito and T. Takikita : Proc. 47th Ann. World Mg Conf., IMA, France, May (1990).
- 6) 榎原勝弥：素形材, 50, No.9, (2009), 42-45.
- 7) K. Nishinaka, M. Akiyama and T. Ito : Proc. 62nd Ann. World Mg Conf., IMA, Germany, May (2005).
- 8) 井藤忠男：アルトピア, Vol.38, No.8 (2008).
- 9) 井藤忠男：中国のマグネシウム産業の現状（2007年）と LCA, アルトピア, Vol.38, No.8, (2008).
- 10) Simone I. Ehrenberger, et al. : Status and Potentials of Magnesium Production in China—Life Cycle Analysis Focusing on CO₂ Emissions, IMA 65th Annual World Magnesium Conference, Poland, (2008).
- 11) 経済産業省：平成 17 年度化学物質安全確保・国際規制対策推進等報告書, 資料編第 4 章, (2006).
- 12) Working Group III of the IPCC : Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Cambridge.
- 13) World Bank : A Strategy for CBM and CMM Development and Utilization in China, July 2007.
- 14) IPCC : Guideline for national GHG Inventories, Volume 2, Energy, Chap.1, (2006).
- 15) 磯貝宏道, 秋山友宏, 八木順一郎：日本金属学会誌, 60, 338 (1996).
- 16) I. Saita, et al. : J. Alloys and Comp., 82, 446 (2007).
- 17) 秋山友宏, 張興和, 佐藤政仁, 林治弥, 平木岳人, 齊田愛子, 上杉浩之：日本国特許 2008-44832.
- 18) 新居宏美, 藤田陽子, アルトピア, No.4, 32 (2009).
- 19) H. Uesugi, T. Sugiyama, I. Nakatsugawa, and T. Ito : Proc. 67th Ann. World Mg Conf., International Magnesium Association, Hong Kong, May (2010), 49-59.
- 20) 鎌土重晴：NEDO 技術開発機構, 平成 17 年度・平成 18 年度成果報告.
- 21) 株式会社アールスティ：NEDO 技術開発機構, 平成 18 年度成果報告.
- 22) 井藤忠男, 白井秀友：軽金属, 42, (1992), 707.