

# 部材の軽量化による輸送機器の省エネ化

## — 難燃性マグネシウムの研究開発 —

坂本 満<sup>1\*</sup>、上野 英俊<sup>2</sup>

輸送機器の分野では、省エネルギーと二酸化炭素排出量の低減に直結する技術革新が喫緊の課題となっている。この要求に対して機器の軽量化は直接的な効果をもたらすことから、軽量で高機能の構造材料が求められている。マグネシウム合金は、その有力な候補として長らく期待されてきた材料であるが、容易に発火するという致命的な問題を有していた。難燃性マグネシウム合金は、発火性を抑制して金属材料としての実用性を飛躍的に高めた材料である。これを低環境負荷の基幹材料として育成することは、輸送機器の軽量化のための技術革新に大きく貢献する。本稿では、実用化に関わるさまざまな技術課題の解決を通じて、新素材の産業化のための1つの方法論を述べる。

キーワード：難燃性マグネシウム合金、SF<sub>6</sub>ガスフリープロセス、基幹材料、軽量構造材料、連携ネットワーク

### Energy savings in transportation systems by weight reduction of their components

#### – Research and development of non-combustible magnesium alloys –

Michiru Sakamoto<sup>1\*</sup> and Hidetoshi Ueno<sup>2</sup>

Technological innovation bringing direct energy savings and reductions in carbon-dioxide emissions has been cited as an urgent issue in the field of transportation machinery. To cope with this issue, demand has been growing for structural materials that are lightweight yet offer high functionality because weight reduction of machinery can be immediately beneficial. A new non-combustible magnesium alloy with drastically improved areas of application is sought in which flammability is suppressed—the worst weakness of magnesium alloys. Developing this new alloy as a basic component for reducing environmental load will contribute greatly to technological innovation for weight reduction in transportation machinery. This paper examines one methodology for industrialization of a new material through the resolution of the various technical issues related to practical application of non-combustible magnesium alloys.

Keywords: Non-combustible magnesium alloy, SF<sub>6</sub> gas-free process, basic material, lightweight structural materials, research network

#### 1 研究の目的とアウトカム

エネルギー消費の主要な位置を占め、今後の急激な増加が危惧される運輸部門の省エネルギーは、世界の喫緊の課題となっている。その対策の中で、最も直接的で効果的な対応策の1つに輸送機器の軽量化がある。現状の輸送機器を支えるのは基幹材料である鉄鋼やアルミニウムであるが、これに続く新たな基幹材料となり得る軽量材料が望まれている。マグネシウムはこの目的にかなう材料候補の1つであり、環境調和循環型技術への社会ニーズの観点から近年とみに期待が高い材料である。資源として飛び抜けて豊富であり、世界的に普遍的に分布し、金属材料としての再生のたやすさと環境毒性のない安全性等、循環型材料として、また、鉄鋼やアルミニウムのような基幹材料として

の大きい可能性を秘めた材料である。しかしながら、さまざまな技術的課題によりいまだに基幹材料と呼べるほどの地位を獲得するにはいたっていない。マグネシウムの特性を工業的な視点で定量化してこれを基幹材料として育て上げることができれば、資源・エネルギー使用の最適化の観点から、真に持続的な社会の実現に貢献することができると期待される。

具体的には、マグネシウムの広範な実用化により、およそ動くもの全ての軽量化を実現する。自動車・鉄道・航空機等の輸送機器や機械要素・ロボット等の軽量化による高効率化を目指す。当面は、エネルギー効率に優れた大量輸送システムである鉄道車両部材への適用による一層の省エネへの貢献を目指し、将来の量産技術の展開により自動車

1 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98、2 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1

1. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan \* E-mail: michiru-sakamoto@aist.go.jp, 2. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST Shuku-machi 807-1, Tosu 841-0052, Japan

Received original manuscript January 23,2009, Revisions received March 30,2009, Accepted March 30,2009

やささまざまな機械構造材への広範な適用を目指している。これによって、環境負荷の低減を通じてそれ自体が環境調和型である基幹材料の確立と、輸送機器の省エネルギーに貢献する。

## 2 マグネシウムにおける最大の課題

マグネシウムの最大かつ深刻な問題は大気中で燃えることである。この性質が、古く戦前から航空機用構造材料として実用されていたにも関わらず、その後の一般民生用途への適用の大きな心理的障壁であったことは確かである。製造技術の面からも、マグネシウムの発火・燃焼性のために溶解・鋳造プロセスは特殊なものとなり、これまでに培われてきた一般の金属材料技術をそのまま流用することは困難であった。難燃性マグネシウムの研究では、マグネシウムを難燃化して通常の大気中での製造プロセスを開発することを核として、産業界に受け入れられる低コストプロセスを確立することを目指してきた。特に、環境負荷の大きな地球温暖化ガスでありながら溶解工程で防燃ガスとして必須であった六フッ化硫黄ガスを用いないプロセスは、今後のこの分野の方向性を決める重大な技術である。これを通じて、マグネシウムの製造技術が特殊なものから一般的な技術へ転換することができる。すなわち、従来の認識である特殊な材料から、誰でも安心して使うことができる基幹材料として、安全で環境に優しい高効率の量産プロセスの確立を目指している。

難燃性マグネシウムの製造技術は、作る側すなわち生産現場における安全・安心と、生産の低コスト化（特殊設備が不要となる）にとって福音となるばかりではなく、さらに重要なことはユーザーの視点すなわち使う側の安全・安心を満たすことにある。マグネシウムの発火に対する心理的な不安感に加えて、事故や火災に際しての安全性については、ともしれば見過ごされてきた重要な問題であった。

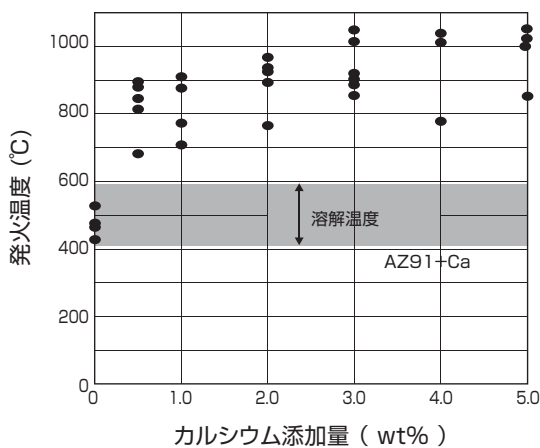


図1 代表的な難燃性マグネシウム合金 (AZX912) の発火温度

## 2.1 カルシウム添加による難燃性の発見と難燃化機構

難燃性の発見は掘出し物を見つけたようなものであった。アルミニウムに各種のセラミックス微粒子を分散させた軽量金属基複合材料の開発において、溶融アルミニウムにセラミックス微粒子を直接混入して分散させるには、溶湯と粒子表面の濡れ性の改善と溶融アルミニウムの粘性を最適に制御することが重要である。この研究においてさまざまな元素を添加して溶湯性状変化への影響を探索する過程で、カルシウムが主として溶湯の粘性の制御に効果的であることが見いだされ、微粒子分散アルミニウム合金基複合材料の低コスト製造プロセスが開発された。より軽量化を狙ってこの技術を溶融マグネシウムへ適用する過程で、溶融マグネシウムに添加したカルシウムが示す溶融マグネシウムの劇的な性状変化—大気中での難燃性という偶発的な発見が難燃性マグネシウム合金の研究の端緒であった。

図1には代表的な難燃性マグネシウム合金であるAZX912合金 (A:Al,Z;Zn,X;Ca、数値はwt%) の大気中における発火温度を示す。この図から明らかなように、カルシウム添加によっておよそ200°C以上も発火温度が上昇する。ここまで発火温度が上昇すると大気中での溶解が可能となる。

一方、発火特性と同様に、カルシウムを含むか含まないかで溶融状態のマグネシウムの表面にできる酸化物の様相が著しく異なっている。純マグネシウムの場合、不活性雰囲気中で溶解してから速やかに大気中に取り出して燃える前に急冷したものの表面酸化物は、溶融状態で大気に触れた時間がわずか数秒という短時間にも関わらず、極めて厚く成長している。また、その構造は微粒子からなる多孔質であり、酸化物は表面の保護膜とはなり得ていないことを推測させる。この様子を図2の酸化物表面の走査型電子顕微鏡写真に示す。図で(a)、(b)はそれぞれ低倍率の

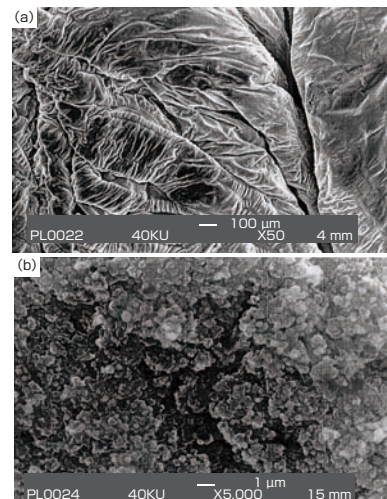


図2 純マグネシウムの酸化物被膜の表面組織

全体組織及び高倍率の拡大組織である。このような酸化物の組織は、酸化物のでき方から理解することができる。純マグネシウムは融点温度において、金属に対する生成酸化物の体積の比 (Pilling-Bedworth ratio) が1よりはるかに小さく、したがって生成した酸化物が溶湯表面を完全に覆いつくすような保護被膜にはなり得ない。このことがカルシウムを含まない合金にできる酸化被膜が多孔質組織を呈する原因と考えられる。

これに対して、カルシウムを含んだ合金の酸化物表面の様子を図3の走査型電子顕微鏡に示す。図で (a)、(b) はそれぞれ低倍率の全体組織及び高倍率の拡大組織である。カルシウムを含んだ合金では、溶融状態で大気中に1時間保持して十分に表面を酸化させた場合でも、できた被膜は厚く成長することがなく、表面の組織は極めて緻密である。カルシウムを含むマグネシウム合金にできる酸化被膜は、カルシウムを含まない場合とは著しく異なる様相を示す。この結果は、カルシウムを含む合金が溶融状態にある時は、その表面に緻密な酸化被膜が形成し、これが酸化に対して極めて有効な保護被膜として働いていることを示している。

純マグネシウムとマグネシウム-カルシウム系合金におけるこのような表面組織の著しい相違は、酸化被膜の構成相や形成機構に違いがあることを示唆している。酸化被膜をさらに詳細に調べると、カルシウムを含む合金の表面酸化物ではその最表層が主として酸化カルシウムからなることが明らかとなっており<sup>1)</sup>、この酸化物が緻密な組織であることが、大気からの酸素供給や溶湯表面からのマグネシウムの蒸発を防ぐ効果的な障壁となり、その保護作用により発火温度が上昇するものと考えられる。

なぜカルシウムを含んだ合金だけにこのような緻密な酸化被膜ができるのかということは、非常に重要で興味深い

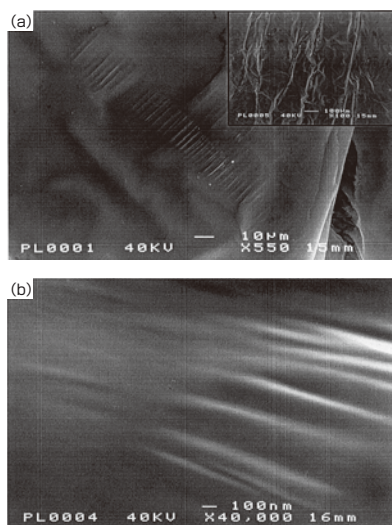


図3 Mg-5Ca 2元合金の酸化物被膜の表面組織

問題ではあるが、この形成機構に関しては実はいまだによくわかってはいない。カルシウムはマグネシウムよりさらに活性であり、カルシウム単体ではマグネシウム単体（あるいはカルシウムを含まないマグネシウム合金）と同様に緻密な表面酸化被膜が形成されない。明らかなことは、マグネシウムとカルシウムが共存するということが極めて重要な意味を持つのであろうということである。カルシウムとマグネシウムが共存状態で酸化が起こると、さまざまな相互作用が起こると考えられる。カルシウムが融点近傍の温度域でマグネシウムの酸化物の還元を期待できる数少ない元素の1つであることから、酸化カルシウムからなる酸化被膜最表層の形成は、マグネシウムに対するカルシウムの優先的酸化に加えて、カルシウムによる酸化マグネシウムの還元と酸化カルシウムの生成も関与する複雑な過程であると考えられる。

カルシウムの効果の発見後、さまざまな元素による同様の効果の探索は徒労に終わり、カルシウムのように劇的な発火抑制効果を示す添加元素は発見されなかった。現在のところ、カルシウムに勝る難燃化元素はないのである。それは、上記のメカニズムから考えて、酸化物形成自由エネルギーがマグネシウムより低い元素はカルシウムのみであることから妥当な結論であると考えられる。

### 3 必要とされる個々の要素技術課題の解決

実用化のためには、個々の要素技術課題を適切に設定し、着実に解決してゆくことが必須である。しかし、ことは言うほど簡単ではない。その時々直面する課題について行き当たりばったりに対応するならば、ゴールにたどり着くまでには極めて長い時間がかかるであろう。新しい材料を世に出すためには明確なシナリオが必要である。難燃性マグネシウムの開発においては、上記の①新素材の発見に引き続き、②素材を材料に持ち上げる精製技術の開発、③部材化技術（成形加工技術）、④信頼性評価、および⑤製品化の各段階での技術的なブレイクスルーが必要であった。

前章で述べたようなメカニズムにより、カルシウム含有合金は大気中でも安全に溶解・鋳造ができるので、マグネシウムのベース合金として製造プロセスを安全でシンプルなものにすることができる。シンプルであるということは工業的な観点からは重要なことである。しかし、ここで何よりも重要なことは、そもそもマグネシウムを基幹材料として実用化する根本の動機は、マグネシウムがもたらすであろう低環境負荷社会の実現である。したがって、全ての各要素技術はこの指導原理に基づいてなされなければならないということである。以下に、その概要を紹介する。

#### 3.1 クリーンな溶湯精製技術

難燃性合金は活性なマグネシウムにさらに活性な金属カルシウムを添加することから、一般の合金に比べて溶製時<sup>1</sup>に生成する酸化物などの介在物が溶湯に多量に混入し、強度や耐食性に悪影響を及ぼすことが問題となる。介在物はその比重が溶湯に近いために、沈殿させたり浮上させたりして分離するのが難しく、完全な分離除去は困難である。通常はマグネシウムやカルシウムの塩化物、フッ化物を主とするフラックスを用いて取り除くのが一般的であるが、フラックスが微量でも残留すると耐食性に悪影響を及ぼし、これを回避しようとするで材料歩留まりが低下する等の問題を有している。また、塩化物やフッ化物からなる産業廃棄物が出ることも問題である。せっかく防燃ガスやフラックスを使わない大気溶解プロセスを開発しても、その精製工程でフラックス等を使うのであれば技術としての価値は大きく損なわれてしまう。我々はこの問題について第1に環境面でクリーンであり、できるだけ単純でしかも効果的な方法を開発することが生き残りの条件と考えた。

熔融した難燃性合金の表面には緻密な酸化被膜ができ、これによって酸化が防止されると同時に、熔融状態のマグネシウムの高い蒸気圧が見かけ上極めて低く抑えられていることに着目した。すなわち、減圧法による精製技術の開発であり、難燃性マグネシウム合金を実用材料へと変えるブレークスルーであった。この方法は極めてシンプルのために実施が容易で、特に大規模な生産現場でも導入できることが特徴である。

減圧法は、合金溶湯を減圧下で保持することにより、介在物を合金溶湯の表面に浮上・分離させて除去する簡単な方法である。溶湯中には種々のガスが溶存しているので、介在物は減圧により生成したガス気泡に付着して溶湯表面に短時間で浮上する。通常マグネシウム合金の蒸気圧は高いので減圧下に置くことはできないが、難燃性マグネシウム合金は溶湯表面に形成する酸化被膜の働きにより、見

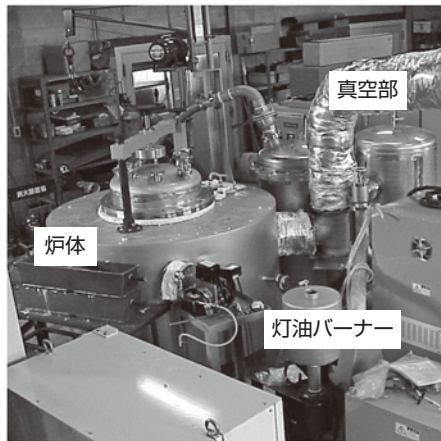


図4 減圧精製機構を備えた難燃性マグネシウム合金溶製炉（容量 100 kg）

かけ上の金属蒸気圧が極めて低くなるので、アルミニウムや鉄鋼のように減圧法による精製処理を適用することができる。減圧による到達圧力は通常の機械式ポンプの排気能力で充分であり、保持時間は溶湯の量に応じて数十秒から数分である。このため、大型の溶解炉でも容易に応用することができる。図4には産総研に設置された減圧精製機構を備えた容量 100 kg の難燃性マグネシウム合金溶製炉の概観を示す。従来のフラックス法ではフラックスに由来する蒸気等によって作業環境が劣悪になるが、本法は作業環境が安全でクリーンであり、また、フラックスが溶湯中に残留する心配がないので材質的な信頼性を損なう心配もないというメリットを持っている。この技術を現在のところ4社へ技術移転し、量産化を進めているところである。一方、一連の溶製プロセスは大気溶解が中心となっており、最後の段階で介在物を除去するために蓋をして減圧して精製を行うという、基本的に大気プロセスであることから、 castingプロセスの低コスト化に直結し、実用化されている。ただし、後に述べるように難燃性合金の鋳物を製造するためには多くのノウハウを必要とするのが現実である。

### 3.2 塑性加工技術

第2の問題は塑性加工に関するものである。鉄鋼やアルミニウムに比べてマグネシウムの冷間<sup>2</sup>での加工性は劣悪であり、ユーザーが初めて採用することは大きなリスクを伴う。このことはマグネシウムの製造コストを悪化させ、産業界での現実的な高い障壁となる。鉄鋼やアルミニウム合金が立方晶を基本とする異方性の小さい構造を有するのに対してマグネシウムは異方性の大きな六方晶であり、冷間ではそもそも豊かな塑性変形能は乏しく、本質的に塑性加工性の問題を有している。難燃性合金では問題がさらに深刻となる。マグネシウム合金は強度と耐食性の面からアルミニ

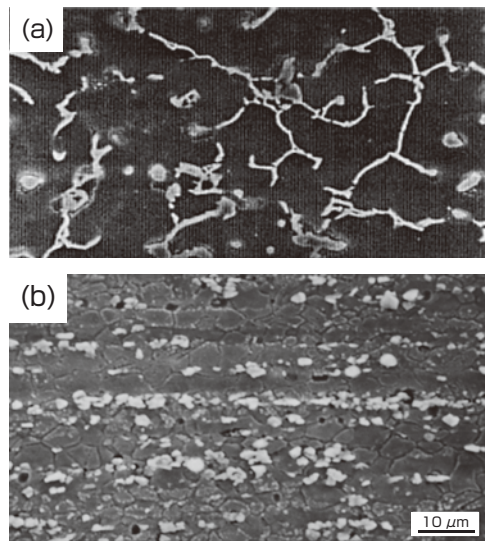


図5 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の組織  
a: 凝固組織、b: 押し出し加工後の組織

ウムを含むことが必須であるので、難燃化のために添加したカルシウムと高融点のアルミニウム-カルシウム系金属間化合物が形成し、これが初晶として粒界にネットワーク状に晶出し、溶湯の湯流れ性を悪化させ、機械的性質、特に延性に悪影響を及ぼす。この組織を図5aに示す。アルミニウム-カルシウム系金属間化合物は母相金属中への固溶度が極めて小さいため、熱処理等でこのような凝固組織を制御することは容易ではない。

一方、塑性加工を想定すると事情は異なってくる。塑性加工性に劣る難燃性合金であっても、基本的には熱間<sup>用語2</sup>で、より静水圧的な加工法である押し出し加工を適用することにより良好な加工ができる。この時、粒界のネットワーク状のアルミニウム-カルシウム系金属間化合物は押し出し方向に微細に破碎されるとともに、母相金属は再結晶作用により結晶粒が微細化し、全体に極めて微細な組織となる（図5b）。これによって強度および伸びは著しく向上する。図6にはAMX602合金の機械的性質を示すが、押し出し材の場合は熱間押し出し後にT4処理<sup>用語3</sup>を施したものは室温伸びが20%を越えるレベルにまで改善する。このことは、難燃性合金の塑性加工を最適に行えば、強度と伸びのバランスに優れた材料を得ることができることを示している。

塑性加工の重要な技術に鍛造と圧延がある。熱間押し出し加工による製品開発と平行して、押し出し材を出発材料として鍛造や圧延による製造技術の開発が必要である。また、凝固組織を微細制御した低コスト連続铸造材からの直接鍛造技術も研究途上にある。板材に関しては基礎研究の成果としてようやく冷間成形性に優れた組成・組織が見いだされつつあり、低コストの量産技術開発フェーズへの移行段階にある。また、マグネシウム合金の合金種の乏しさ、特に高強度材や耐熱材料に関しては依然としてさらなる基礎研究が必要である。

構造材料として実用化するためには信頼性評価が重要である。図7は難燃性合金AMX602押し出し材の回転曲げによる疲労強度評価結果の一例である。この材料の特

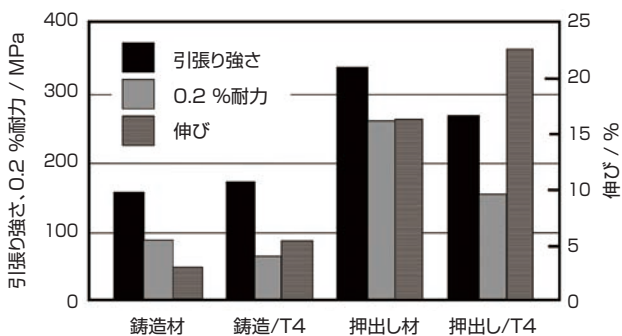


図6 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の機械的性質

徴は、明確な疲労限があり、またアルミニウム合金に比べて切り欠き感受性が低いことが明らかとなっており<sup>[2]-[4]</sup>、構造材料としては使いやすい材料である。ただし、破壊は全て介在物起点<sup>用語4</sup>で起こり、清澄な高品質素材の製造技術が非常に重要であることが明らかとなっている<sup>[2]</sup>。

### 3.3 リサイクル技術

一方、ユーザーサイドの材料選択の指標として最近ではリサイクル性の高さが重要となっている。またリサイクル性は製造コストにも直結する重要な特質である。リサイクルに関する研究として铸造メーカーにおいて溶製時のインハウスリサイクル技術の開発が進められており、現状では回転材利用率50%以上を維持する精製レベルにある。また、自動車部材として実用した場合のシュレッダー処理を想定した安全性と、処理材の機能利用に関する検討例として、大気中での機械式粉碎結果の一例を図8に示す。写真は、篩径38μmアンダーの粒子であり、機械粉碎が安全にできることを示している。さらに、このような粉碎粒子の利用方法として、排水中のヒ素やホウ素、亜鉛、クロムの吸着特性を調べ、マグネシウム水酸化物が強力な吸着剤となることを明らかにしている<sup>[5]-[7]</sup>。

### 4 製品化のための産学官連携スキーム

新しい材料を世に出すためには、それがもたらすであろう技術の全体を俯瞰した上で、明確なビジョンと実現のためのシナリオが必要であると考えられる。難燃性マ

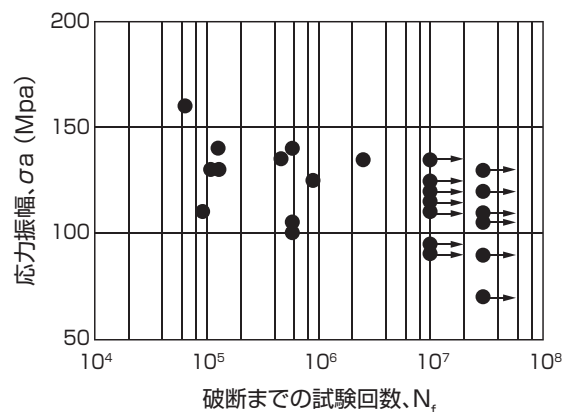


図7 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の疲労強度評価

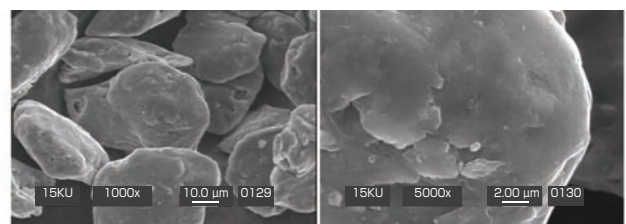


図8 難燃性マグネシウム合金 (AMX602) の粉碎粒子 (38 μm 篩下)

マグネシウム合金は燃え難い、したがって通常の金属材料と同じ範疇で開発を進めることができる。しかし、既存のアルミニウム合金とは似て非なるものであるがゆえに既に完備された他の金属材料のような総合的な技術データや加工システムを迅速に整備する必要がある。そこで、マグネシウムに適応した個々の技術のあるべき姿はどういうものなのか、という観点からシナリオを策定することが必要であった。幸いにして、難燃性マグネシウムをユニークなシーズとして興味を示した複数の異業種企業の理解を得て、共通の目標を持つ連携組織を設けることができたことから、この連携を通じて研究開発のシナリオを早い段階から策定・共有でき、効果的な開発を進められたと考えている。

材料は実際に使われて始めて材料であり、使われるためには従来材料の例を見るまでもなく、極めて広範な技術集積とそれらの経験の蓄積が必須である。基幹材料であればなおのこと総合的な技術の蓄積が必要であり、これを自然の流れに委ねる場合には極めて長い時間を要するのが普通である。我々は、難燃性マグネシウムの実用化を加速するために、個々の要素技術開発にあたっては、それぞれのメンバー間で総合的・トータルなイメージを共有しつつ、材料の実用化という1つのシナリオの下で技術開発を進めることを意図してきた。そしてそれらの個々の要素技術が相互に作用しあう活動を通じて、新素材を一気に工業材料へとイメージを変え、基幹材料としての育成の流れを構築することに努めた。このためには、企業や大学、公設試験研究機関等の性格を異にする機関の広範な連携ネットワークを通じた研究開発が効果的であった。

技術の総合した最終的な姿、すなわち環境親和性材料体系の構築を通じたアプリケーション展開という目標を共

有しながら研究開発を進めた。そのなかには、縦糸としての産と横糸としての基盤技術という質的に相違する研究活動のコラボレーション体制による面的な研究開発体制の構築が、研究の効率化に非常に有効であった。前者の産においては、図9に示すように川上から川下へ、素材から製品への垂直連携体制を取り、相互にフィードバックすることで技術課題が明確になる。また、素材から部材まで取りあえず産業レベルで入手できなければ、そもそもの研究すらおぼつかないとの意識から、図の各企業では最低限の商業的な量産体制を備えている。一方、基盤技術に関しては図10に示すように、大学や公設試験研究機関が、上記の企業活動に対してそれぞれの局面でシーズ技術の供給と技術課題に対する横断的できめこまやかな技術的な支援ができるように、密接なネットワークを構築して支援体制とした。この構図によって、産業連携においては各業種が点として孤立的に技術開発するのではなく、面的に同時進行する総合的な技術開発を意識できるようになり、基盤技術のネットワークにおいては個々の技術課題の意義や位置付けが孤立化することなく明確に視覚化された状態で提示され、産業との直接的関係の下での要素技術開発ができる。後者の基盤技術ネットワークにおける副次的な成果として（公的機関としては究極的なアウトカムであるが）、1つのシナリオを共有し方向性を一致させた研究開発手法の効果を成功体験として持つことであり、総合的な技術開発のための連携研究プラットフォームが醸成されることである。難燃性マグネシウムにとどまらず、このプラットフォームが今後ともさまざまなイノベーションの醸成母体となり得ると期待される。

## 5 実用化と開発研究の現状

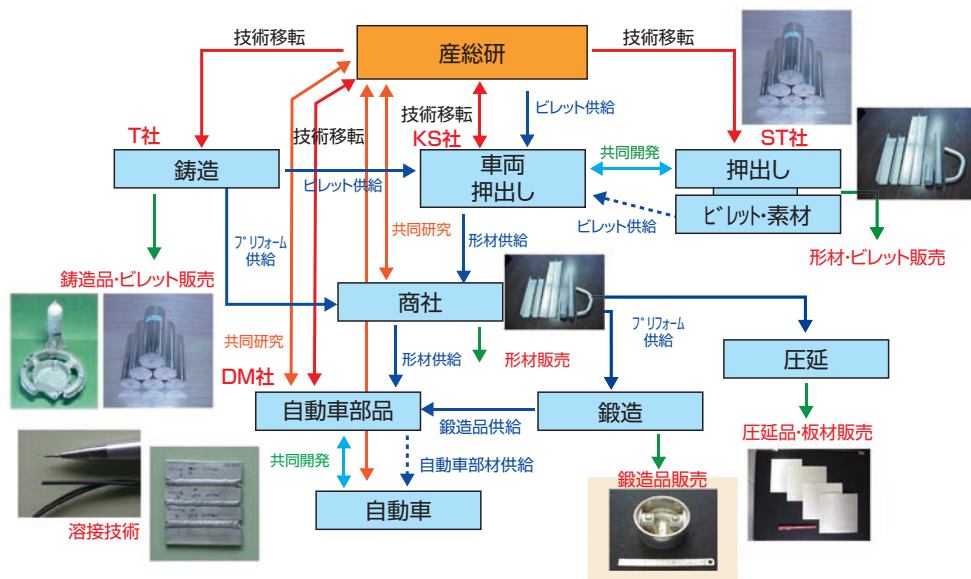


図9 難燃性マグネシウム合金の量産化体制

・**鋳造用素材・塑性加工用ビレット材**

塑性加工に供する素材はできる限り清浄度の高い高品質なものである必要があり、最も川上に位置する素材の品質がその後の塑性加工品の品質とコストに大きく影響する。我々は、素材供給メーカーとして企業3社に減圧法による溶湯精製技術を移転し、高品質で低コストの素材ビレットの量産と用途開発を進めている。素材メーカーを複数社体制としたのは、素材の安定供給を図るためであり、その内の1社は大量生産を想定したビレット製造から押し出しまでの一貫生産が可能であり、もう1社は多品種少量生産が可能な鋳造メーカーで、将来の機械構造用部品としての需要をにらんで小回りのきく生産体制を目指している。図9の右上および左端中央にある写真に円柱状の棒材形状の塑性加工用ビレットを示す。

・**鋳造材**

難燃性合金は大気中で燃えにくいことから金属を溶かして型で固める鋳造においては、基本的に低コストでの鋳物製造が可能であるので、上記の鋳造メーカーと共同で各種機械部品に向けた鋳造技術の研究開発を進めている。鋳造そのものはアルミニウムと同様に行うことができ、特筆すべき点はAZ91合金ベースの難燃性合金の場合、大気中で生砂型への鋳造も可能なことである。ただし、難燃性合金は前出の特異な凝固組織により通常合金以上に湯流れ性が劣り、またアルミニウムや鋳鉄に比べて熱容量が小さいために凝固が急速であるので鋳造方法案や鋳造条件の問題が十分に解決されていない。実施にあたっては依然として技術蓄積や経験、ノウハウを必要とする。しかし、とにかくコストの面で有利であるので、今後さまざまな機械部品への応用が期待される。図11は最新鋭新幹線車両へ採用された荷棚受け部品の例である。難燃性合金AZX912のダイキャスト製で、鉄道車両に採用される世界初のマグネシウム部品である。

・**熱間押し出し材**

アルミサッシのフレームのような複雑で様な断面を持つ長い製品は、金属を加圧して穴の開いたダイスから押し

出すことにより、効率よく量産することができる。複雑形状断面や中空などの形状が容易にできる押し出し材は基本的な工業素材である。難燃性マグネシウム合金も熱間での押し出し加工によって型材の製造が容易にできるので、上記のビレットメーカーとアルミニウム押し出し専門メーカーと2社体制で用途開発を進めている。現在、後者のメーカーから難燃性マグネシウム型材の実用化の第1号として、高速道路料金所のETC阻止棒用に角型パイプ材が製品化されている。これは、阻止棒の開閉速度の高速化に伴い、従来のアルミニウム型材では軸部からの破断が多発し軽量化が望まれたためであるが、当初はCFRP製であったものが交換後のリサイクルの問題と製品価格の観点から、さらに難燃性マグネシウム合金製に代替が進んだ例である。この用途では、単なる軽量化のためのアルミニウム代替ではなく、高比強度とリサイクル性という他にはない特性がキーになるという、材料代替の教訓的な興味深い例である。

・**熱間鍛造材**

強度や信頼性を向上させる目的で単純形状の金属材料を叩いて鍛えることを鍛造と呼び、金型で鍛造することにより品質の揃った部品を大量生産することができるので、工業的に重要な加工技術である。難燃性マグネシウム合金の鍛造は一般の合金に比べてより難しく、加工温度や加工速度を厳しく管理しないと容易に割れが発生する。しかし、あらかじめ熱間押し出し加工を施して微細な再結晶組織とした鍛造素材では鍛造性が飛躍的に向上し、ハンマ式鍛造機による高速成形が可能である。したがって製品によっては、予備押し出しという工程数が増加しても、トータルコストの面で有利となる可能性もあることから、現在、自動車部品メーカーと共同で開発を進めている。ただし、現段階ではいまだに製造コストの壁が高く、これを克服するためには3章2節で述べたように、原理原則まで立ち返った基礎的な研究が早急に求められている。

・**板材**

金属の板材はさまざまな形状に容易に加工できることから基本的な工業素材である。普通、回転する2つのロール

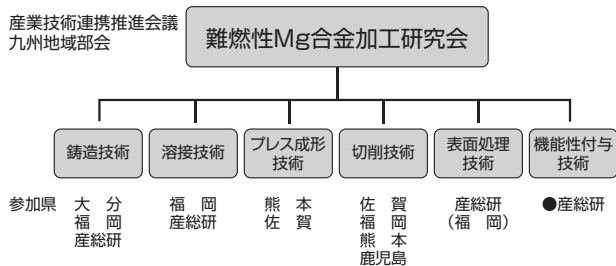


図10 公設研連携による難燃性マグネシウム合金の加工技術基盤研究体制



図11 難燃性マグネシウム合金 (AZX912) の荷棚受け部材

の間に常温または高温の金属を通して薄く板状に延ばす圧延法で成形されている。マグネシウム合金の板材についても需要は高いが、素材が割れやすいことから圧延が難しくアルミニウム等に比べて圧延工程の繰り返し回数が多くなることから価格が高いことが問題となっている。サイズや精度の面で制約はあるが、熱間押し出しによって直接板材の製造が良好にできることが確認されている。上記の押し出しメーカー2社ともに、板厚1 mm以下のものが容易に製造できている。また、押し出し材をその後に圧延する場合においても、良好な性質を有していることが確認されている。ここでも難燃性合金の利点として、熱間圧延温度でも発火や酸化の心配が少ないため薄板の製造ができ、現在、圧延メーカーにおいて板厚0.1 mmの製品の製造が可能となっている。ただし、板材の製造プロセスは工程数が多いために鍛造材以上にコストの問題が深刻であり、低コストの板材の大量供給には、加工性の良い材料開発から製造プロセスまで、いまだ多くの技術開発が必要である。

#### ・押し出し形材を用いた溶接構造体

鋳鍛造材や板材・押し出し形材などの塑性加工材を接合した構造体は、自動車や鉄道車両、航空機、各種機械構造体等、さまざまなアプリケーション展開の鍵となる基盤技術である。図12は、アプリケーションの1つとして、鉄道車両の腰掛けの例である。本製品は現行の車両用腰掛け規格をクリアし、軽量化に大きく貢献することからJRへ提案し、客先での検討が進められている。ところで、このたった1つのアイテムにも、鋳造材・押し出し形材・板材を用い、曲げ成形やプレス成形が必要であり、接合技術がキーとして重要である。接合は基礎的な接合試験と疲労試験を通じての信頼性補償が必須である。この例ではTIG溶接<sup>用語5</sup>を採用し、そのための溶接棒の製造も必要であった。また、部位によっては難燃性合金に適した新たな表面処理も施している。このことは、実際の製品開発においていかに幅広い技術の総合が必要であることを物語っており、すべての要素技術について前記の研究開発ネットワー



図12 難燃性マグネシウム合金（AMX602）の鉄道車両用腰掛け

クの大学や公設試験研究機関における基礎的検討のフィードバックが重要であった。

## 6 残された課題

1つの材料を基幹材料として育成するためには、川上から川下まで極めて幅広い技術開発とその蓄積が必要である。その意味では残された課題は何かというより、ようやく開発の入り口に立ったという状況である。ただ、我々は将来に向けて、環境調和型の材料としてマグネシウムを上手に使う技術を培っていかねばならない。そのためには、LCAの観点から原料採取に始まって精錬、加工、リサイクル技術、カスケードリサイクルの社会システム等、材料の全般にわたる広範な技術開発が残されている。特に、現状の精錬工程はチタンやアルミニウムと並んでエネルギー多消費であり、ようやく将来に向けた抜本的な省エネルギー化に向けた取り組みが始まっている。精錬技術に関するわが国の現在のポテンシャルは、過去に比べて格段に進歩しているが、ここでもこれまでにない画期的なブレイクスルーが熱望される。一方、個別課題としては、溶湯やインゴットの品質評価技術、低コストの表面処理技術、高信頼性の接合技術、さまざまな材料標準および評価技術の標準化、等々、課題は山積みである。上記の課題を解決し、低環境負荷・低コストプロセスによる基幹材料の産業化を目指したい。

### 用語説明

用語1: 溶製: 金属を、その熔融状態を経て加工すること。熔融金属を型に流しこんで凝固させる鋳物や塑性加工用の金属塊の製造法がこれに当たる。溶製に対して金属の粉末を固めて成形する方法や金属塊を塑性変形させて加工する塑性加工法等がある。

用語2: 冷間加工と熱間加工: 金属の塑性加工を行うときの温度域による区別のこと。金属の結晶は室温等の低温域で塑性加工して変形させると、硬度や強度を増加(加工硬化)させることができるが、逆に割れが生じたり加工性が低下する。これに対して高温域で塑性加工すると、強度の向上は望めないものの加工性は飛躍的に高まる。一般に前者を冷間加工、後者を熱間加工と呼び区別される。加工された材料を固有の温度に加熱することにより、結晶内部は歪がない新しい結晶粒へ変化する再結晶と呼ばれる現象が起こる。厳密には、再結晶が起こらない低温域での加工が冷間加工、再結晶が起こる温度以上の高温での加工を熱間加工と呼んで区別する。

用語3: T4処理: 金属の機械的性質をコントロールする種々の熱処理の中の1つ。母材に添加した合金元素を高温で十分に保持して均一に分散させてから急激に冷却する



と、低温では析出するはずの合金元素を母材に溶けこんだままの状態を凍結することができ、これを溶体化と呼ぶ。その後で溶体化材を適当な温度で一定時間保持すると、溶け込んでいた合金元素が微細な結晶として母材中に析出し、これにより強度や硬さ、延性といった性質が変化する。この一連の熱処理を時効処理という。溶体化状態からの時効を室温で起こさせることを自然時効と呼び、高温下で強制的に起こさせることを人工時効と呼んで区別される。さまざまな熱処理方法の中で、特に軽金属の分野ではこの2つが頻りに用いられ、これらを指す記号として前者をT4処理、後者がT6処理と呼ばれている。

用語4：介在物起点：疲労による強度の低下は、物体の中に微視的な割れ目が発生し、これに繰返しかかる力によって割れ目が次第に進展して大きくなることによる。最初の微視的な割れは物体内部で応力集中が起こる場所に発生する。応力集中はさまざまな場所で起こるが、物体の中に含まれる異質な固体不純物（金属では酸化物等の非金属介在物）の周辺は応力集中の場所となることが多い。また、このような介在物と母材との界面の結合が弱い場合、介在物の存在は母材の欠陥となって微小な割れ目と同様の作用をする。このような介在物の周りが起点となる破壊のこと。

用語5：TIG溶接：Tungsten Inert Gas溶接の略で、金属を溶かして接合する溶接法の1種。金属を溶かす方式で、アーク放電を用いるものの中で、高融点のタングステン棒と接合母材の間に高電圧を掛け、タングステン棒からアークを出すことによって母材を溶かして接合する方法である。基本的に手で溶接するために複雑形状にも適用でき、非鉄金属の溶接では広く一般的に用いられている。

## 参考文献

- [1] 坂本 満, 秋山 茂, 上野英俊, 大城桂作: マグネシウムへのカルシウム添加による酸化被膜特性の変化と難燃化, *鑄造工学*, 69, 227-233 (1997).
- [2] 北原陽一郎, 池田健介, 島崎洋明, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(AMCa602Bの疲労強度に及ぼす非金属介在物の影響), *機械学会論文集*, 57, 7-8 (2004).
- [3] 北原陽一郎, 池田健介, 島崎洋明, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(第1報, 3種類の難燃性マグネシウム合金の定量的疲労強度特性), *機械学会論文集A*, 72, 661-668 (2006).
- [4] 池田健介, 北原陽一郎, 野口博司, 坂本 満, 上野英俊: 難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性(陽極酸化コーティング材の特性), *機械学会論文集*, 57, 9-10 (2004).
- [5] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: マグネシウムおよびマグネシウム合金の排水処理への応用, *資源素材学会春季大会概要* (2006).
- [6] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: 排水中の有害金属の除去と有価金属の回収-廃水中のAsの除去(第一報), *日本鉄鋼協会第149回春季講演大会概要* (2005).

季講演大会概要 (2005).

- [7] 野口文男, 吉田信一郎, 山根政博, 柿本幸司, 橋 武史, 阪本尚孝, 川田勝三: 排水中の有害金属の除去と有価金属の回収-マグネシウムによる廃水中のCrの回収(第二報), *日本鉄鋼協会第153回春季講演大会概要* (2007).

## 執筆者略歴

坂本 満 (さかもと みちる)

1980年筑波大学第一学群自然学類卒業、1985年筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了、博士(地質学)。同年4月工業技術院九州工業技術試験所機械金属部入所後、金属基複合材料の研究開発に従事。2007年8月産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門に配置換、同年11月中部センターへ異動。本研究では難燃性マグネシウム合金の難燃化機構の解明と連携ネットワーク構築・運営に従事した。



上野 英俊 (うえの ひでとし)

1965年福岡県立浮羽工業高校卒業、同年4月工業技術院九州工業技術試験所機械金属部入所後、金属基複合材料の研究開発に従事。2001年産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門環境適応型合金開発グループ長。一貫して軽量金属材料の研究に従事し、金属基複合材料の実用加工技術開発および発泡アルミニウムの実用化に成功。本研究は主として難燃性マグネシウム合金の塑性加工技術を担当した。



## 査読者との議論

### 議論1 マグネシウム合金の位置づけについて

コメント・質問 (清水 敏美: 産総研研究コーディネータ)

本研究の社会的価値は輸送機器や機械要素の軽量・高効率化を介しての省エネルギー化です。しかしながら、現在の基幹材料でもあり、本文中にも記述がある鉄鋼やアルミ、さらにはCFRPなどと比較して、なぜマグネシウムが研究対象の中心になっているのかが不明確です。第1章では、シナリオの導入にあたってまず重要なマグネシウムの位置づけを明確にする必要があると思います。

回答 (坂本 満)

マグネシウムを難燃化することで基幹材料としての地位を確立し、その先にある鉄鋼やアルミニウムのような既存の基幹材料とは別次元の輸送機器の軽量化に大きく資することが目標です。基幹材料としての可能性のある材料は多くはなく、マグネシウムはその数少ない候補の1つと考えております。

社会の基盤をなす輸送機器の容積を考慮すると、これを軽量化するための材料は鉄鋼やアルミニウム並の供給ができる基幹材料でなければならず、工業材料としてその資格がある材料としての観点からマグネシウムを選択しています。確かに、定性的には様々な材料が軽量材料として考えられます。また、既存の輸送機器システムがそのまま将来にわたって使われるわけではなく、新しいシステムが登場するのは間違いないわけで、その構成材料は既存の材料とはかけ離れたものになる可能性もあると思います。しかし、構造材料としての面から考えた場合、やはり既存の鉄鋼材料やアルミニウム並みの供給に対する安定性、それも環境負荷の観点からの保障が必要になるものと思います。

### 議論2 製品化を意識したシナリオの作成について

コメント・質問 (村山 宣光: 産総研先進製造プロセス研究部門)

構成学的な視点から興味ある点は、カルシウム添加によるマグネシウムの難燃化の発見をされたとき、製品化まで見越して、どの程度開発すべき要素技術を設定され、研究計画を立案されたかという点です。また、精製技術以降の研究でも、溶湯表面に形成する酸化被膜の効果を想定して減圧法を選択されたのかどうか、押出し加工による組織の微細化とそれによる鍛造、圧延は、当初からシナリオとして描くことができたかどうかという点も大変関心があります。多くの試行錯誤があったのではないかと想像されます。試行錯誤と必然性の混在が材料開発に関するシナリオの特徴ではないでしょうか。

回答（坂本 満）

製品化を意識したシナリオというのは、我々研究者は苦手なわけですが、企業にとっては当たり前のことであり、要は最も効率的に最短距離で製品化に結びつくシナリオの策定が当初からできたということが重要です。ただし、最短距離といってもそのルートが荒唐無稽のものであっては元も子もなく、やはり確固とした技術的な裏づけが重要となります。その役割を大学や公設試験研究機関の連携組織が支えるという構図がどうしても必要となると思っています。ここでは連携組織がやはりシナリオを共有しているという点が重要であって、これがないと研究が拡散し、点として繋がりに欠けるものとなってしまおうと考えています。

### 議論3 部材の軽量化による省エネ効果について

コメント・質問（清水 敏美）

およそ動くものの軽量化を実現するという大命題のもと研究が進捗し、代表的な成果物として難燃性マグネシウム合金を用いた casting 材として最新鋭新幹線の荷棚受け部品が採用されています。しかしながら、最初の軽量化という意味で漠然とは理解できませんが、この部品の採用によりどれほどの軽量化への貢献あるいは省エネ効果があったのか、定量的な数値を加筆していただければ読者の理解も深まると考えます。

回答（坂本 満）

定量的な数値があれば軽量化による省エネ効果への貢献が明確になるとのご指摘は、まさにもっともなことであり、日頃から我々も常に意識している点です。しかし、省エネ効果を明確に示すことは、なかなか容易なことではありません。例えば私どもとある自動車メーカーとの共同研究での結果では、自動車のレシプロエンジンのピストンのようなのであれば、エンジンのベンチ試験で通常のアルミピストンとマグネシウムピストンとで明確な差が計測されています。ただし、これはあくまで実験であって、ピストンの実用化は未だ開発途上にあります。新幹線車両の場合は1両あたり50トンほどです。この中で難燃性マグネシウム荷棚受け部品の占める重量は15 kgです。これ

は従来のアルミニウム製をそのままマグネシウムに材料代替したわけではなく、設計が変わり直接比較は難しいのですが、全体でおよそ7.5 kgの軽量化になっております。最新鋭新幹線車両系プロジェクトでは、1両あたり500 kgの軽量化が第一の目標として掲げられ、そのうちの僅か7.5 kgほどではあります貢献しており、それでも車両メーカーから感謝されたと聞いております。かように軽量化の効果をすぐにというのは難しいのですが、将来様々な部材に使われた時にそれが当たり前のことであったかのように考えられる材料となるものと考えております。

### 議論4 産学官連携スキームについて

コメント・質問（村山 宣光）

難燃性マグネシウムの発見に興味を示した複数の異業種企業の理解を得て、共通の目標を持つ連携組織を作ることができたことが、本研究の成功の鍵とされます。連携組織を作るにあたり、知財の扱い、企業間の調整、企業と大学・公設試験研究機関との橋渡し等で苦勞された点あるいは工夫された点をお聞かせください。

回答（坂本 満）

連携組織を作る過程で重要であったことは、まずなにより思想的な方向性の一致が大切であるということです。すなわち、技術の総体としての環境親和性ということが社会的に最も重要であり、難燃性マグネシウム合金の実用化はこの方向に沿うものであるという共通認識を持ちえた企業が連携組織の構成員となっております。企業というのはとくに技術開発とその後のビジネスにのみ関心があるように思われがちで、現に筆者もそのように認識していた面もあるのですが、我々が考える以上に技術開発の根底にある社会的な問題を多面的に捉えて意思決定をすることが日常的に行われており、この構成員も最終的にそのような企業がコアとして残ったわけです。ここにおいては、一方の構成員である大学が、環境親和性という思想的背景を支える役割を担ってくれたことに大きな意味があったと考えています。加えて、連携企業のモチベーションを維持する上では、主役は企業であるという公設試験研究機関の持つ意識が重要であったと考えております。これらを一つのまとまりとしてとらえ、連携組織としての共通の目的意識を維持する努力が重要であると考えます。

しかしながら、ビジネスが見えてくるにつれ、役割分担やその後の知財等、実に様々な問題が次から次へと出てくるのが現実です。これについては、とにかくできるだけ情報を共有すること、メンバー同士で粘り強く話し合っ、一つ一つ地道に対応してゆくことに尽きると考えます。そのために、あらゆる機会を利用して連携組織全体での意見交換の場を設け、その都度、方向性やシナリオの再確認を繰り返すことが重要であったと思います。