

公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所 公開講演会
Salt & Seawater Science Seminar 2024

海水から未来を創る

～製塩工程溶液からのマグネシウム回収と利用～



Contents

1. マグネシウム産業の現状と展望
一般社団法人日本マグネシウム協会 顧問 小原 久
2. カーナライト晶析を利用した高純度塩化マグネシウム回収技術
公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所 研究員 邑上 泰平
3. 製塩苦汁から得られる水酸化マグネシウムの高純度化に関する検討
公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所 主任研究員 峯尾 隼人
4. 製塩工程溶液等を原料とするマグネシウム金属製造技術に関する基礎研究
関西大学 教授 竹中 俊英

日時：2024年12月6日（金）

会場：公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所

協賛：化学工学会，環境資源工学会，軽金属学会，JDA協会，塩元売協同組合，
資源・素材学会，全国輸入塩協会，造水促進センター，
ソルト・サイエンス研究財団，たばこと塩の博物館，日本イオン交換学会，
日本海水学会，日本海洋学会，日本塩協会，日本特殊製法塩協会，
日本粉体工業技術協会，日本膜学会，日本マグネシウム協会，粉体工学会，
分離技術会
(敬称略)

Salt & Seawater Science Seminar 2024

海水から未来を創る

～製塩工程溶液からのマグネシウム回収と利用～

マグネシウム産業の現状と展望

日時:2024年12月6日(金) 13:00～16:00

会場:公益財団法人 塩事業センター 海水総合研究所

一般社団法人日本マグネシウム協会
顧問 小原 久



目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開



マグネシウムの長所と短所

<長所>

- ・資源が豊富にある
- ・構造用金属材料の中では最も軽い
- ・振動制振性等、各種の特性を有する
- ・合金化により、強度等の特性を向上
- ・化学特性に優れ、性能を向上

<短所－問題点>

- ・微粉などは大気中で燃焼しやすい
- ・腐食しやすい
- ・ヤング率が低い
- ・常温での塑性加工性が劣る
- ・マグネシウム生産が一極化している
- ・日本で生産していない

マグネシウムの有効活用が大きな課題。

世界で積極的な実用化研究。

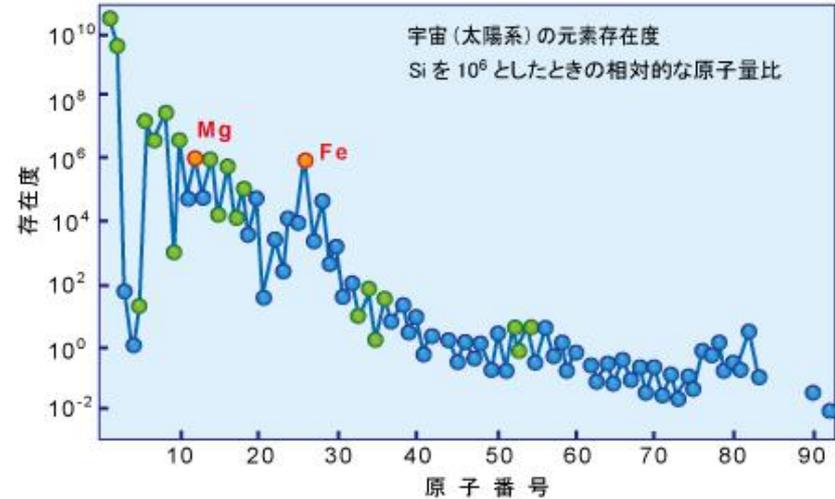
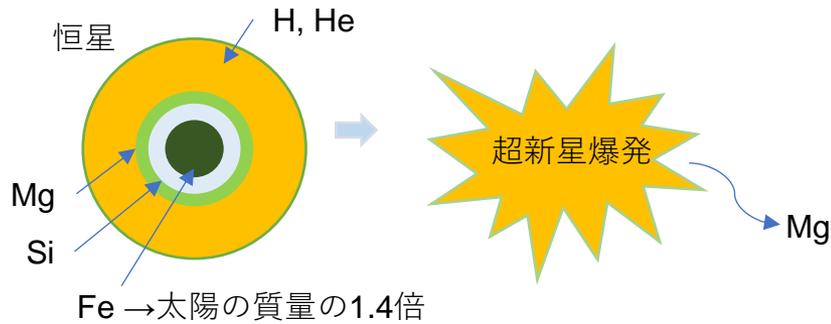
<日本の現状>

- ・マグネシウム材料の研究開発は世界を先導・牽引している
例えば; 高強度合金、不燃・難燃合金、汎用押出合金などの開発
- ・製造加工技術に優れている。例えば、圧延・押出技術、鑄造技術、燃焼防止技術
- ・安全操業対策の普及
- ・リサイクルの実現が課題

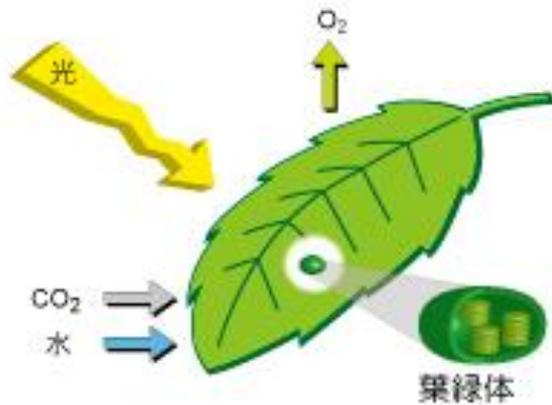


マグネシウムについて

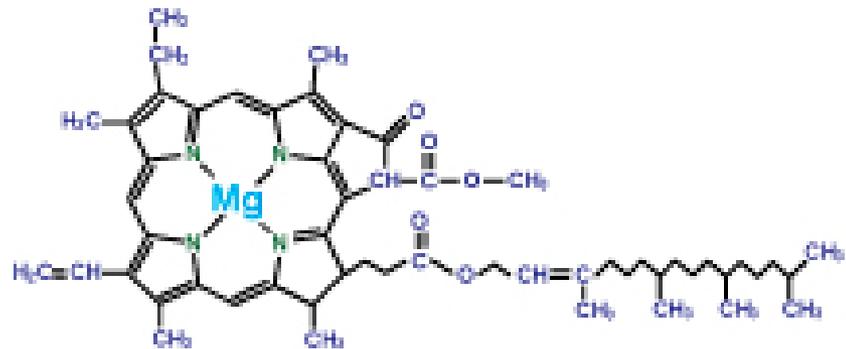
マグネシウムの誕生



生物に必須な元素



光合成を行うクロロフィルの真ん中にはMgがあります。

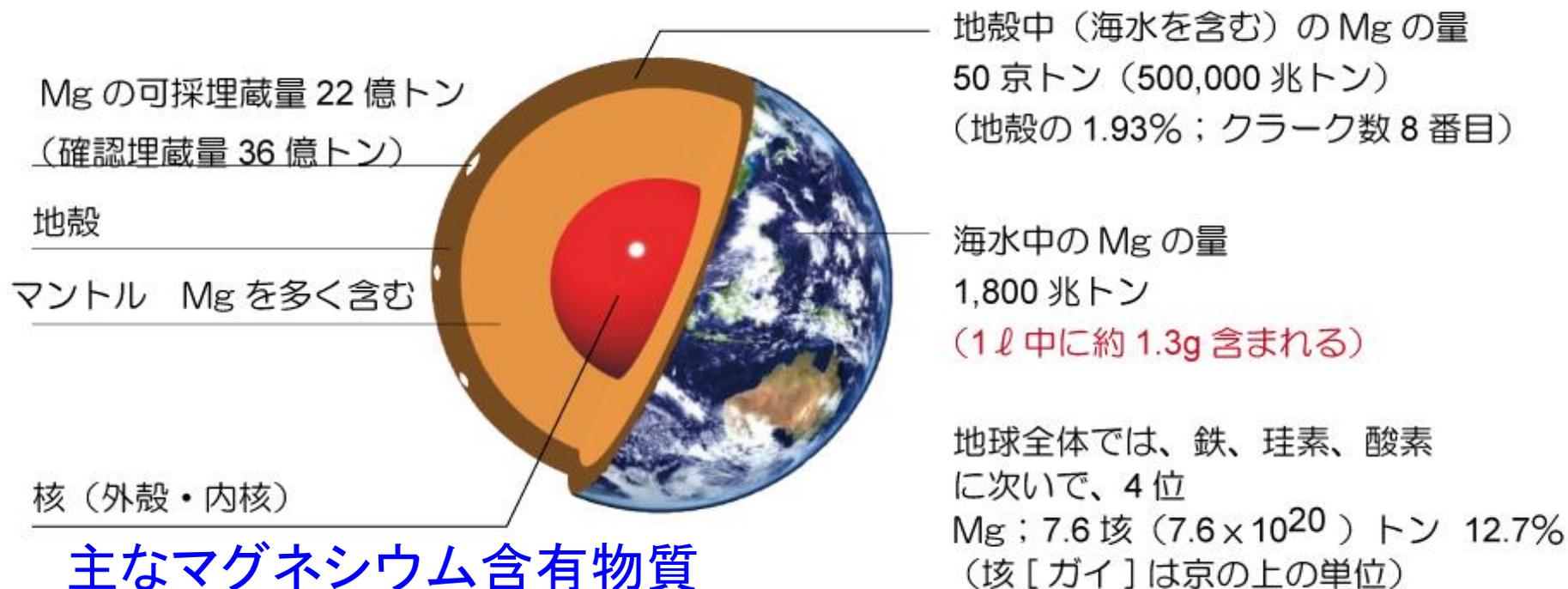


人体に必須な元素

人体必須常量元素 11元素：酸素、水素、炭素、窒素、リン、イオウ、カルシウム、ナトリウム、カリウム、**マグネシウム**、塩素



マグネシウムの地球での存在量



主なマグネシウム含有物質

名 称	組 成	Mg %	
ペリクレーズ	Periclase	MgO	60
ブルーサイト	Brucite	Mg(OH) ₂	41
マグネサイト	Magnesite	MgCO ₃	28
ドロマイト	Dolomite	MgCO ₃ ・CaCO ₃	13
橄 欖 岩	Olivine	(MgFe)SiO ₄	28
蛇 紋 岩	Serpentine	3MgO・2SiO ₂ ・2H ₂ O	26
滑 石	Talc	3MgO・4SiO ₂ ・H ₂ O	23
海 水	Sea water	NaCl・KCl・MgCl ₂ などの溶液	0.13
鹹 水	Brine	"	0.7~3
カーナライト	Carnallite	MgCl ₂ ・KCl・6H ₂ O	9
キーゼライト	Kieserite	MgSO ₄ ・H ₂ O	17
カイナイト	Kainite	MgSO ₄ ・KCl・3H ₂ O	9

目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開



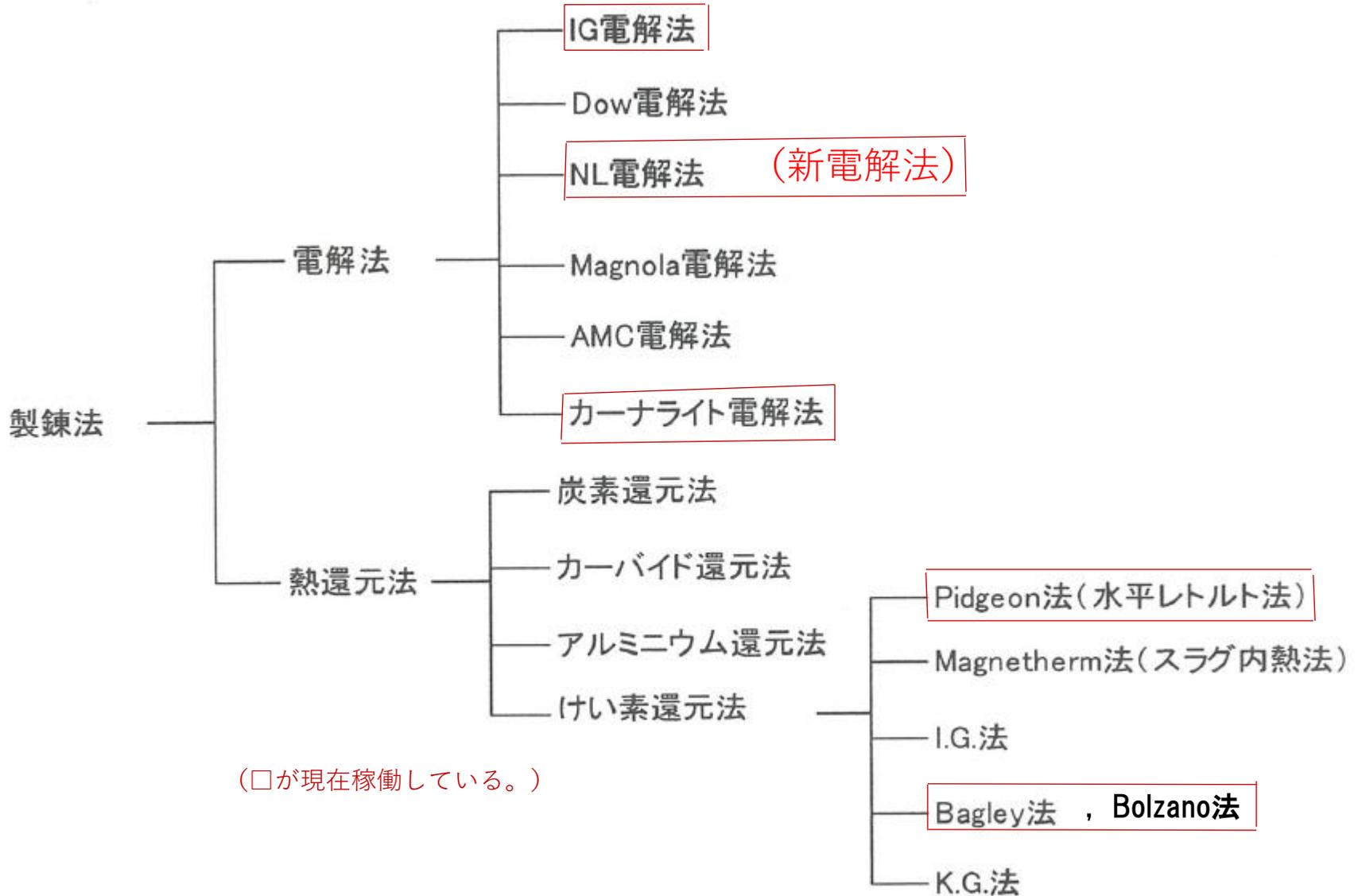
マグネシウムの誕生

- 1808年：デーヴィー（Sir Humphry Davy, イギリス）がマグネシウムを発見。
- 1830年：ファラデー（M.Faraday, イギリス）が溶融塩化マグネシウムから電気分解によるマグネシウム析出に成功。
- 1831年：ビュシー（A.A.B.Bussy, フランス）が熱還元による金属マグネシウムの分離に成功。初めての金属マグネシウム塊を作った。
- 1852年：ブンゼン（R.W.E.Bunsen, ドイツ）が電解法によって金属マグネシウムを得た。現在の塩化物電解法の基礎。
- 1855年：マッティーセン（A.Mathiessen, ドイツ）が $3KCl+4MgCl_2$ に少量の塩化アンモニウムを加えて溶解して電解法により金属マグネシウムを得た。
- 1882年：フィッシャー（F.Fischer, ドイツ）、グレッツェル（R.Gräzel, ドイツ）が溶融塩電解法によるマグネシウムの大量生産に成功。

<Pidgeon法>

- 1941年：ピジョン（Lloyd M. Pidgeon, カナダ）が4in直径のレトルトを用い、半工業的規模でFe-Siで還元して、極めて純度の高い金属マグネシウムを得た。
- 1942年：カナダのDominion Magnesium社のHaley工場において量産を開始した。
- 1956年：我が国の古河マグネシウム株が、栃木県小山市において、ドロマイトを原料に生産を開始した。

マグネシウムの製錬方法



以前、海水を原料として操業していた
世界最大のダウ・ケミカル社フリーポート工場



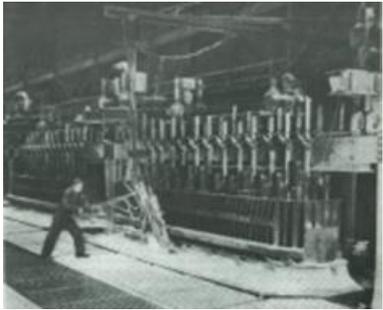
日本において海水を原料にマグ
ネシウムを生産した宇部興産(株)



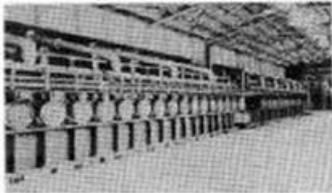
マグネシウム還元炉

■マグネシウムの製錬方法

電解法(Dow法)

海水・塩水	電解	マグネシウム(地金)
	 <p>電解炉</p>	<p>製錬</p> 
<p>海水・塩水、鉱石から採取した塩化マグネシウムを、塩素で濃縮し、無水塩化マグネシウムを精製。</p>		<p>無水塩化マグネシウムを電気分解し、地金を製造</p> <p>●マグネシウムの使用電気量  約14千kwh/トン</p>

ピジョン法(熱還元法)

ドロマイト	還元	マグネシウム(地金)
 <p>ドロマイト鉱石</p>	 <p>還元炉</p>	<p>溶解</p> 
<p>ドロマイト鉱石[CaMg(CO₃)₂]を焼成し酸化物としてフェロシリコンと混合し、ブリケットを製造</p>	<p>ブリケットを真空中、高温下で加熱還元し、マグネシウム蒸気を凝集させ、結晶として取り出す。</p> <p>再度溶解し、地金とする</p>	
<p>ブリケット100kg</p>	<p>マグネシウム結晶 15kg</p>	

■世界で稼働中のマグネシウム製錬工場

操業状況	国	会社名	製錬方法	使用原料	製錬能力
稼働設備	米国	US Magnesium	新電解法	塩水	64,000
	ブラジル	RIMA	熱還元法	ドロマイト	22,000
	イスラエル	Dead Sea Magnesium	電解法	塩水	32,000
	中国	宝武镁业科技股份有限公司	熱還元法	ドロマイト	100,000
		物产中大柒鑫合金材料有限公司	熱還元法	ドロマイト	80,000
		府谷県京府煤化镁业有限责任公司	熱還元法	ドロマイト	40,000
		陝西三忻集团实业有限责任公司	熱還元法	ドロマイト	40,000
		聞喜県八达镁业有限公司	熱還元法	ドロマイト	45,000
		垣曲县五龙镁业有限责任公司	熱還元法	ドロマイト	60,000
		山西銀光華盛镁业股份有限公司	熱還元法	ドロマイト	65,000
		山西瑞格金属新材料有限公司	熱還元法	ドロマイト	50,000
		山西水发振鑫镁业有限公司	熱還元法	ドロマイト	30,000
		榆林市天龙镁业有限责任公司	熱還元法	ドロマイト	30,000
		その他中国企業	熱還元法	ドロマイト	821,100
	中国合計				1,361,100
	トルコ	KAR Mineral Madencilik	熱還元法	ドロマイト	15,000
	イラン	Shemsh Felez Royal	熱還元法	ドロマイト	6,000
	ロシア	Solikamsk	電解法	カーナライト	18,500
		Avisma	電解法	カーナライト	35,000
	カザフスタン	Ust-Kamenogorsk Titanium-Magnesium Plant	電解法		30,000
ウクライナ	Kalush	電解法		18,000	
	Zaporozhye	電解法	カーナライト	23,000	
セルビア	Bela Stema	Magnetherm法	ドロマイト	5,000	
合計				1,629,600	

目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開



マグネシウムの特徴

- 豊富な資源：海水中に1,820兆トン、鉱石：マグネサイト、ドロマイトに含有
- 他の金属成分を添加し、強度、適度な耐熱性、加工性を向上(アルミ合金など)
- 酸化・還元性能が高い：鉄鋼脱硫、チタン製錬
- 水素を吸蔵し易い：水素吸蔵合金としての活用
- 標準電極電位が卑：犠牲陽極、電池材料への活用
- 人体に無害：生体材料として利用

・・・etc



軽量化ニーズの高い分野を主に使用
・自動車部品、携帯電子機器部品 など

なぜマグネシウム？

構造用金属材料中で最も軽量

忘れられた金属

- ・エネルギー問題
- ・環境問題

(大命題)

- ・環境対策のための輸送機器の軽量化
- ・各種スクラップのリサイクル技術の構築

注目

解決策

マグネシウム



マグネシウムの一般的な物理的性質

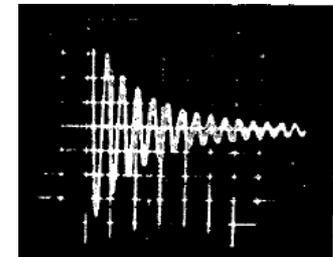
項 目	マグネシウム	アルミニウム	鉄	
密 度	g/cm^3	1.74	2.70	7.87
融 点	$^{\circ}\text{C}$	650	660	1,539
沸 点	$^{\circ}\text{C}$	1,110	2,060	2,740
融 解 潜 熱	J/g	372	397	272
比 熱	$\text{J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$	1.03	0.90	0.46
結 晶 構 造		最密六方晶	面心六方晶	体心立方晶
ヤ ン グ 率	GPa	44.1	68.6	196.0
線熱膨張係数	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 20~200 $^{\circ}\text{C}$	27.0	24.0	12.3
熱 伝 導 率	$\text{J}/\text{cm}\cdot\text{秒}\cdot^{\circ}\text{C}$	1.59	2.22	0.75
標準電極電位	$\text{v}(25^{\circ}\text{C})$	-2.37	-1.66	-0.44

マグネシウム合金の特性

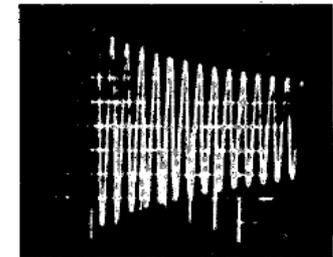
- 実用金属中、最も軽い
- 比強度が高い
- 放熱特性
- 電磁波シールド性
- リサイクル性
- 制振性-減衰能-振動吸収
- 耐くぼみ性
- 切削性
- 寸法安定性
- 鋳造性
- 耐薬品性
- 耐アルカリ性
- 起電性
- 分解性
- 水素吸蔵性
- 生体適合性

金 属	切削所要動力指数 R_v
マグネシウム合金	1.0
アルミニウム合金	1.8
黄銅	2.3
鋳鉄	3.5
軟鋼	6.3
ニッケル合金	10.0

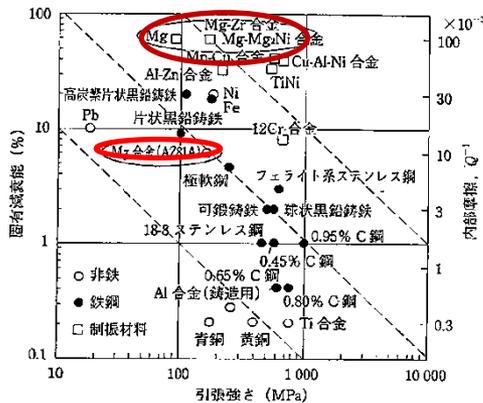
切削特性



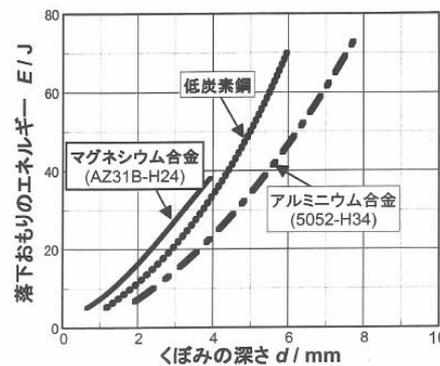
(a) KIA マグネシウム



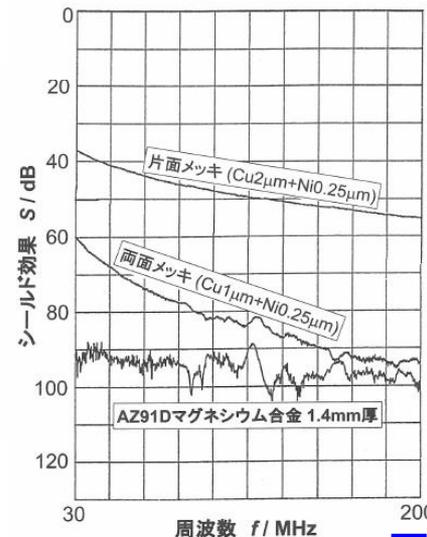
(d) 355 アルミニウム



振動吸収特性



耐凹み特性



電磁波シールド特性

制振特性



最近注目されている新たな特性

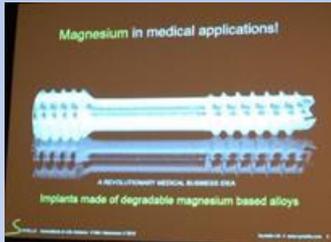
人体に害がない

起電特性

アルカリ特性

水素吸蔵性

電磁波シールド性



・洗濯マグちゃん

・水素吸蔵合金

・雑音防止

・植物の育成

・還元水素水

・電磁波防止

生体用ボルト

Magnesium battery

・耐コンクリート性

・水素発生器

・振動防止



・水質改良剤

・汚水発電剤

ステント
ボーンプレート

Magnesium light



防燃対策	溶湯の状態では酸素との反応が速い
成形加工	結晶構造の特長から塑性加工性が劣る
耐食性	塩素イオン, 酸, 塩類の雰囲気弱い
電食対策	電位が卑で, 他金属との接触で腐食

防燃対策



保護されていないマグネシウム溶湯



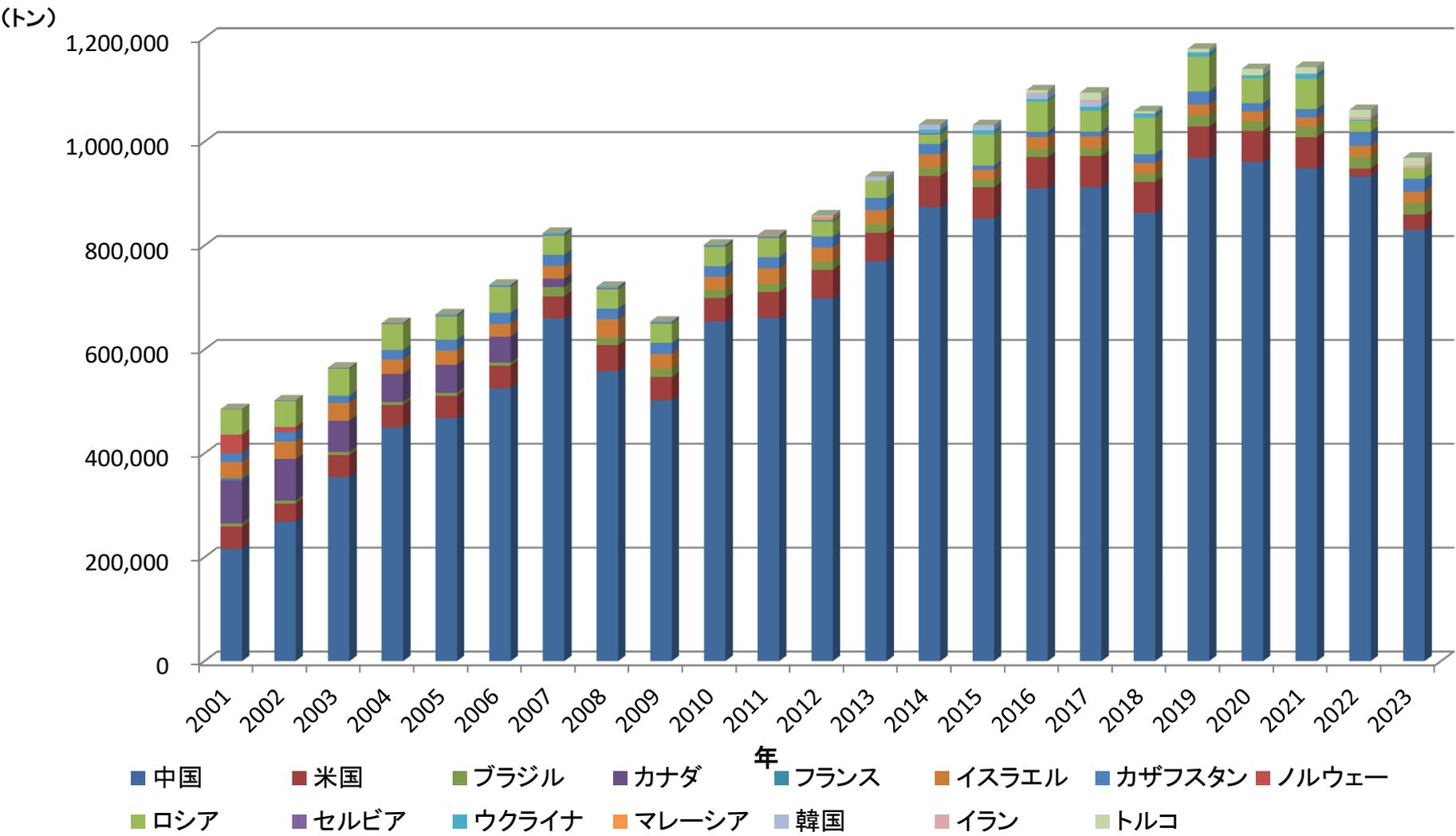
保護されたマグネシウム溶湯

目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開



■世界のマグネシウム生産量推移:2001～2023年



※数値出典:中国は中国マグネシウム協会、その他はUSGS Summariesによる。米国は推計値。



■世界のマグネシウム生産量推移:2018~2022年

(単位:トン)

	2019	2020	2021	2022	2023	23/22 比
中国	969,000	961,000	948,800	933,300	830,000	88.9%
米国	60,000	60,000	60,000	15,000	30,000	200.0%
ブラジル	22,000	18,000	20,000	22,000	22,000	100.0%
イスラエル	21,000	19,000	18,000	22,000	22,000	100.0%
カザフスタン	25,000	16,000	16,000	15,000	25,000	166.7%
ロシア	67,000	48,000	58,000	50,000	20,000	40.0%
ウクライナ	8,000	6,000	10,000	2,000	-	-
イラン	-	-	-	5,000	5,000	100.0%
トルコ	7,000	12,000	13,000	14,000	15,000	107.1%
合計	1,179,000	1,140,000	1,143,800	1,068,300	969,000	90.7%
中国率	82.2%	84.3%	83.0%	87.4%	85.7%	

【出典】

中国:中国マグネシウム協会の発表による。

その他:USGS Summariesによる。

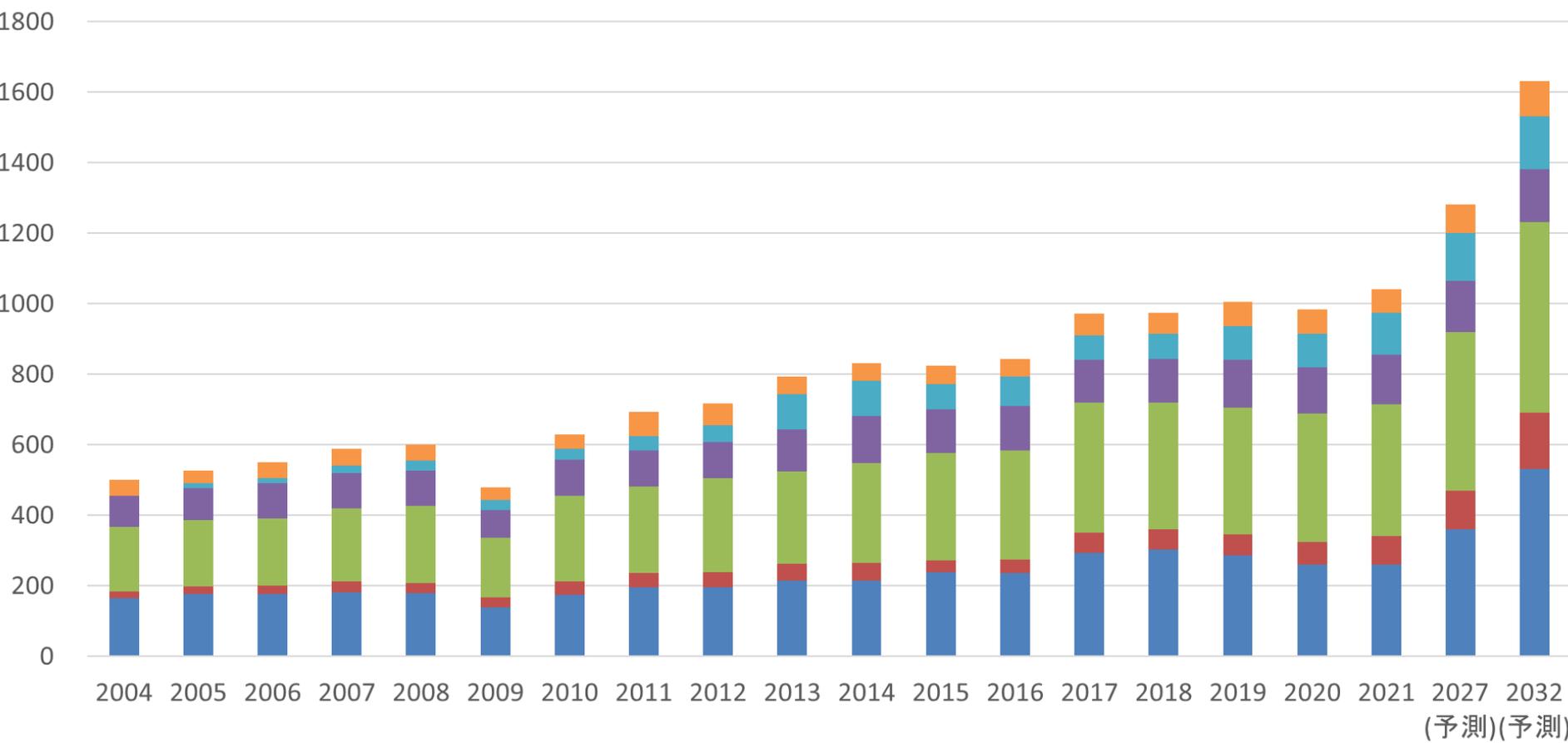
※2023年の数値は暫定値

※米国の数値は推計値



■世界のマグネシウム需要量推移:2004～2021年

(千トン)



■ダイカスト(自動車) ■ダイカスト(その他) ■アルミ合金 ■鉄鋼脱硫 ■金属製錬 ■その他

※数値出典:IMA国際会議、CM Group等の発表資料による。

2021年総需要量:1,040,000トン。内訳として、アルミ合金添加材向け:375,000トン、自動車ダイカスト向け:260,000トン。自動車ダイカスト向けの需要量は10年後には2倍に成長すると予測。



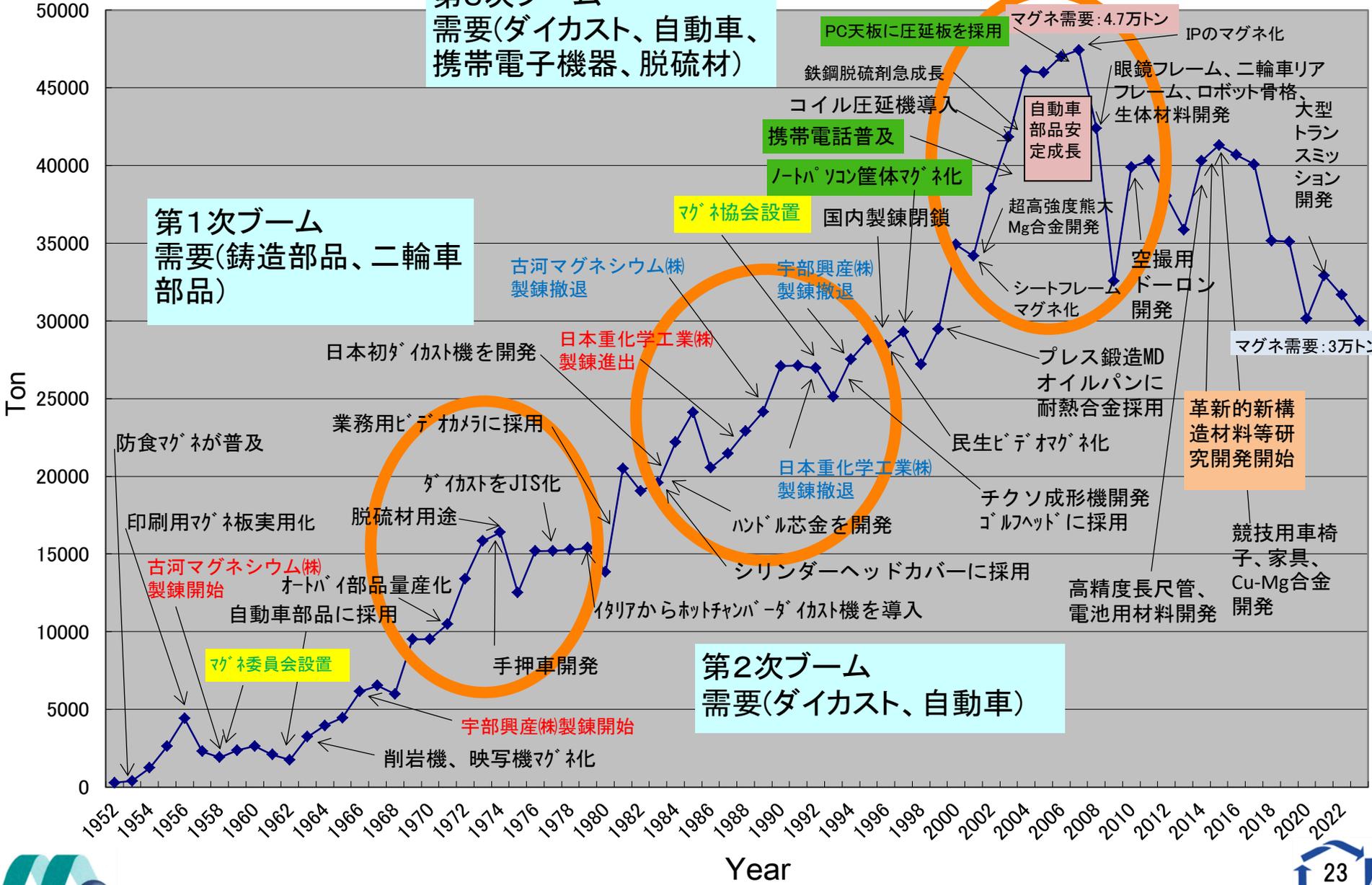
■マグネシウムの輸入量推移

単位:トン

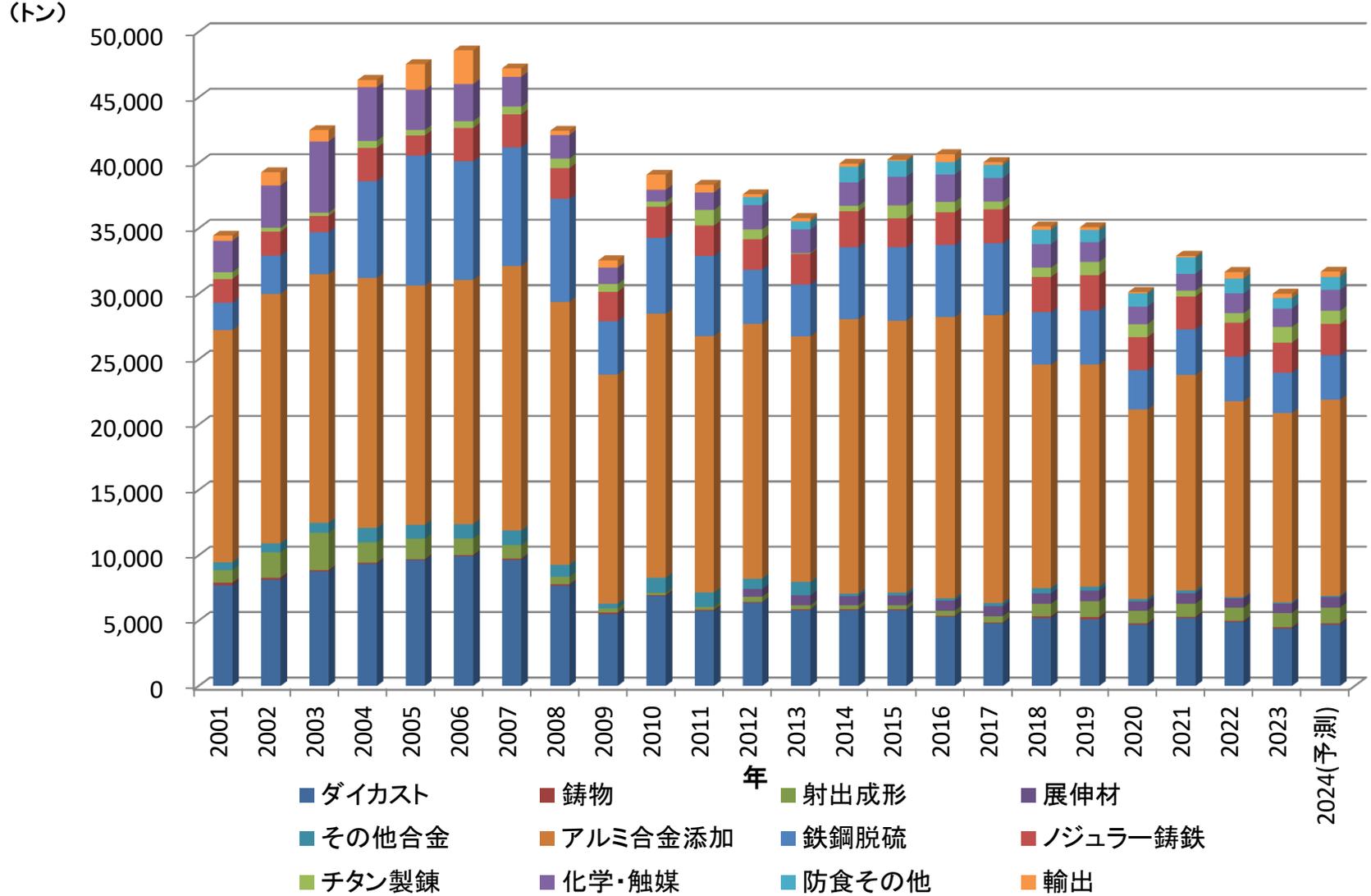
	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	前年比
地金	26,999.6	27,355.0	25,710.5	32,179.5	23,044.6	23,613.3	102.5%
粉・粒	4,161.9	3,844.9	3,474.2	3,240.3	1,429.9	1,633.6	114.2%
その他製品	2,383.8	1,845.3	1,290.9	1,653.4	2,443.2	1,521.7	62.3%
合計	33,545.2	33,045.2	30,475.5	37,073.2	26,917.8	26,768.6	99.4%

出典:財務省貿易統計

<日本のマグネシウム需要推移>



国内マグネシウム需要量推移:2001~2024年(予測)



※数値出典:日本マグネシウム協会調べ。



■国内マグネシウム2023年需要実績／2024年需要予測

(単位:トン)

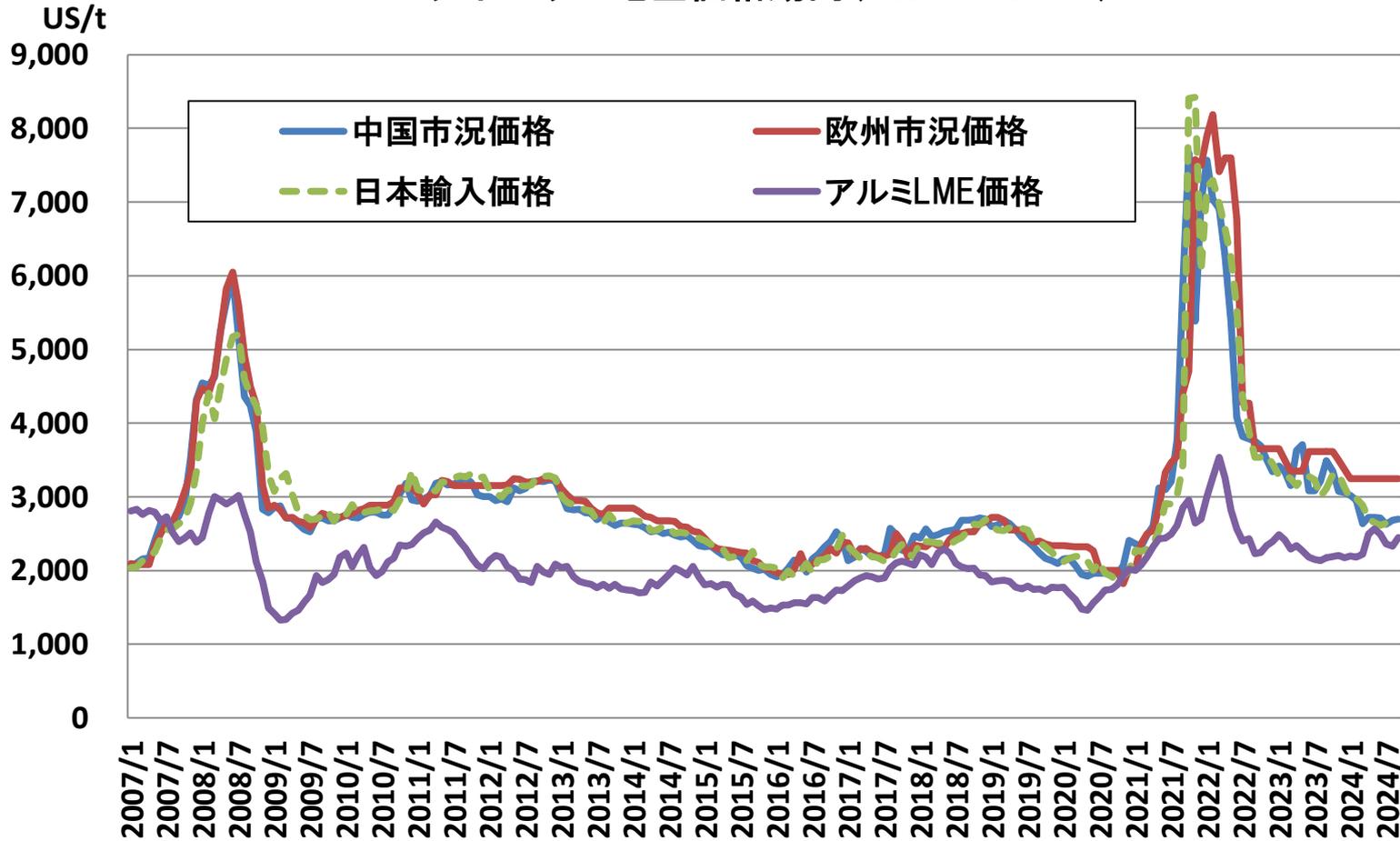
分類\年	2018	2019	2020	2021	2022	2023	23/22 %	2024 (Forecast)
ダイカスト	5,200	5,100	4,700	5,200	4,900	4,400	89.8%	4,700
鑄物	130	190	100	100	100	90	90.0%	100
射出成形	960	1,200	960	1,000	1,000	1,100	110.0%	1,200
展伸材	800	800	700	800	700	700	100.0%	800
その他合金	400	300	200	200	100	100	100.0%	100
構造材小計	7,490	7,590	6,660	7,300	6,800	6,390	94.0%	6,900
アルミ合金添加	17,100	17,000	14,500	16,500	15,000	14,500	96.7%	15,000
鉄鋼脱硫	4,000	4,140	3,000	3,500	3,400	3,080	90.6%	3,400
ノジュラー鑄鉄	2,700	2,700	2,520	2,500	2,600	2,300	88.5%	2,400
チタン製錬	700	1,010	1,000	440	725	1,200	165.5%	1,000
化学・触媒	1,800	1,500	1,350	1,300	1,500	1,400	93.3%	1,600
添加材小計	26,300	26,350	22,370	24,240	23,225	22,480	96.8%	23,400
防食その他	1,100	925	1,000	1,230	1,150	800	69.6%	1,000
内需小計	34,890	34,865	30,030	32,770	31,175	29,670	95.2%	31,300
輸出	258	225	102	140	490	333	68.0%	400
総需要	35,148	35,090	30,132	32,910	31,665	30,003	94.8%	31,700

※数値出典:日本マグネシウム協会調べ。



■マグネシウム地金価格動向

マグネシウム地金価格動向(2007.1-2024.1)



※数値出典：中国、欧州の市況価格はAntaika、日本輸入価格は財務省通関統計、アルミニウムはLME価格より。

・過去15年間のうちに中国の事情を原因とした2回の供給不安と価格変動があり、新規開発計画が止まり、需要の停滞を来すこととなった。
 また、中国集中の供給に不安が高まることとなった。

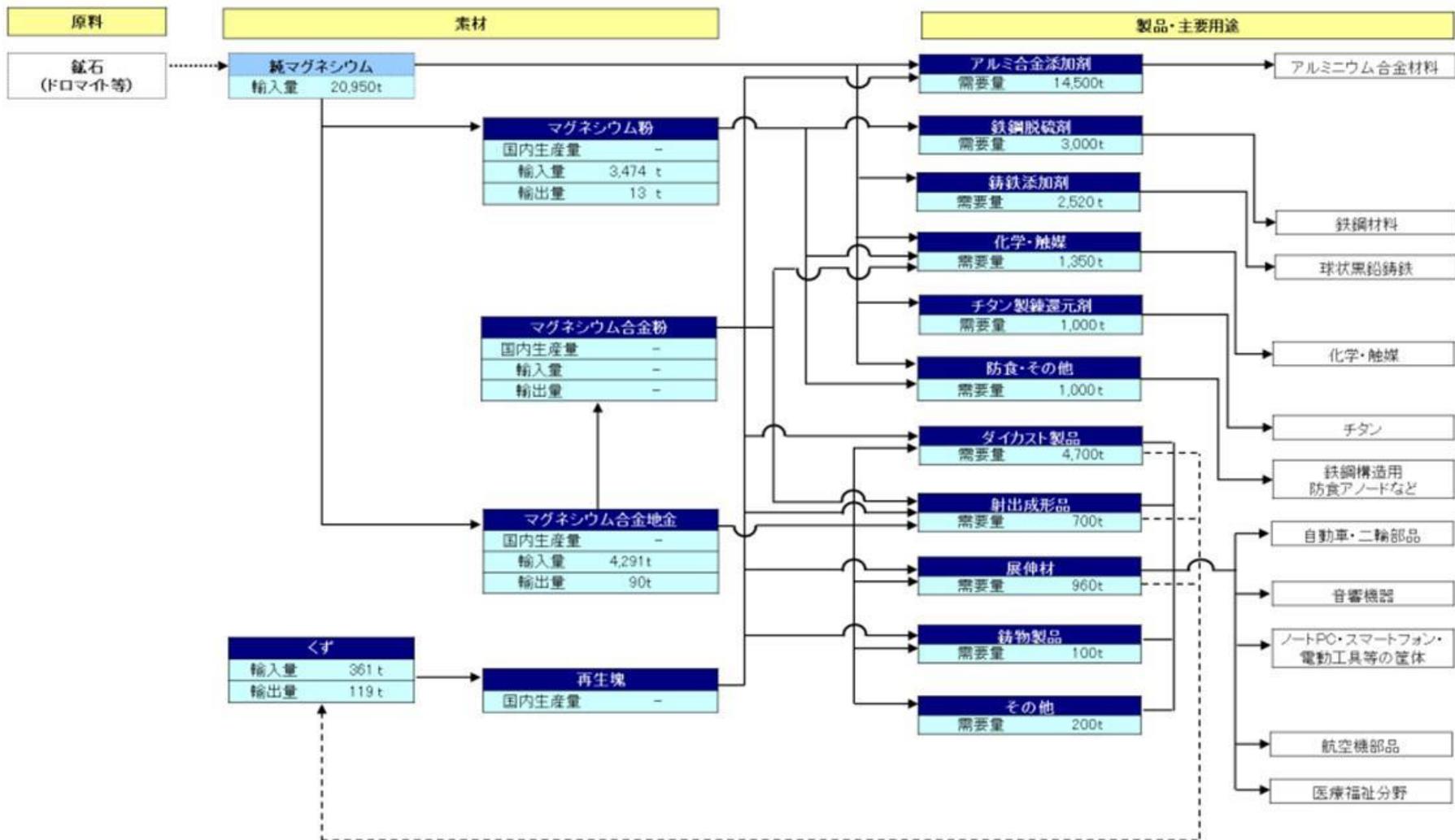


目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開

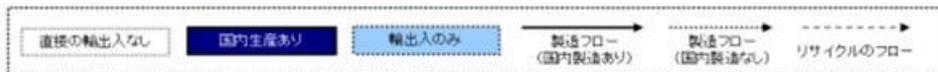


マグネシウムのマテリアルフロー(2020年)



純分換算率: マグネシウム合金90%、その他100%

注「-」: 生産・需要量が不明。輸出入量の記載がない
「0(ゼロ)」: 四捨五入して表の最小単位未満である



出典: JOGMEC 鉍物資源マテリアルフロー

・アルミニウム合金への添加

①アルミニウムでの使用の必要性

- ・強度
- ・成形加工性
- ・溶接性
- ・耐食性
- ・低温特性

②マグネシウム添加合金の用途

- ・建築部品
- ・アルミ缶
- ・自動車パネル
- ・航空機部品
- ・LNG船・タンク
- ・航空宇宙機器
- ・鉄道車両
- ・船舶
- ・半導体製造機器

アルミニウム製品の6割以上にマグネシウム添加合金が使用されているものと見られる。

・鉄鋼への添加

①鉄鋼での使用の必要性

- ・脱硫性(脱硫効率の向上)
- ・高靱性
- ・高延性
- ・溶接性
- ・耐食性

②マグネシウム添加の用途

- ・高炉、電炉での脱硫材
- ・鑄鉄製水道鋼管
- ・自動車用鑄造部品
- ・高耐食性鋼板
- ・防食用アノード(パイプライン、家庭用ガス導入管など)

鉄鋼の脱硫剤として、高品位な鋼材に使用、ダクタイル用として大口径の水道管や自動車部品、Al-Zn-Mg合金による耐食性鋼板として自動車ボディー、建築・土木材料に使用。
鉄鋼の防食用に使用。

・化学触媒としての利用

①化学触媒での使用の必要性

- ・マグネシウムを基とした触媒反応
(グリニャール試薬)

②マグネシウム添加の用途

- ・医薬、電子材料、有機高分子材料
(プラスチック)等の原料や触媒、中間体
- ・一級、二級、三級アルコールの合成
- ・有機金属化合物の合成
- ・医薬、農薬の原体、中間体の製造
- ・有機錫化合物の製造

グリニャール試薬を用いた、新たな合成法の研究も進んでいる。

ただ、マグネシウムを使用しないで金属Liや金属Naなどが使用できる可能性もある。

・チタンの還元材としての利用

①チタンでの使用の必要性

- ・チタンの製造工程で生成される4塩化チタン(TiCl_4)から、塩素を分離するマグネシウム還元材として使用。発生する無水塩化マグネシウム(MgCl_2)を電解法により、塩素とマグネシウムを再生。

②マグネシウム還元したチタンの用途

- ・航空機用材料
- ・屋根など建築用材料
- ・医療用機器(人工関節、骨折固定用ボルト、人工歯根、クリップなど)
- ・スポーツ用具
- ・メガネフレーム

カルシウムを用いた還元法について研究されている。

無水塩化マグネシウム(MgCl_2)の電解では、マグネシウムの1割が消耗し、マグネシウムの補充が必要。



・マグネシウム合金としての利用

①マグネシウム合金使用の必要性

- ・軽量(構造用材料では最軽量)
- ・比強度、比剛性
- ・電磁波遮断性
- ・防振性
- ・耐アルカリ性
- ・生体適合性
- ・水素吸蔵性

②マグネシウム合金の用途

- ・自動車、二輪部品
- ・携帯電子機器(ノートパソコン、タブレット、一眼レフカメラ、携帯電話など)
- ・電動工具(チェーンソー、削岩機、ハンドソーなど)
- ・電池(一次電池)
- ・音響機器(スピーカーコーン、スピーカー筐体、レコードプレーヤー、トーンアーム、音響ケーブル、イヤホン、ヘッドホンなど)
- ・航空宇宙機器(ヘリコプターギヤボックス、トランスミッションケース、など)
- ・医療機器(骨接合用ボルト、プレート、血管用ステントなど)
- ・水素吸蔵合金(水素キャリアー)

マグネシウム合金は軽量なことから、移動エネルギーが少ない。

自動車に装着されたマグネシウム合金部品は、CO₂発生の削減に貢献する。



■マグネシウム合金の長所と用途

長 所	用 途	特 徴
軽 量	自動車部品, 可搬機器等	比重:1.8, Alの2/3, Feの1/4
強度・剛性・薄肉化	携帯電話, ノート型PC筐体, デジタルカメラ筐体, カバー等	樹脂に比較して比強度, 比剛性が大, 薄肉化が可能
熱伝導性・放熱性	ハウジング, 各種筐体等	樹脂に比較して熱伝導・放熱性に優れる。熱に弱いICを保護できる。
電磁波遮蔽性	携帯電話, ノート型PC筐体, カードケース等	樹脂のメッキ品より遮蔽性が良好
振動吸収性	ハンドル芯金, チェーンソー筐体等	振動エネルギーの吸収大
生体適合性	骨用ボルト、プレート、血管ステント等	治癒後に体内で溶融し排出
耐凹み性	携帯電話, ノート型PC筐体, アタッチケース等	他の金属に比べて物体の衝突時の凹みが小さい
被削性	電子機器, 自動車精密部品等	切削所要動力がアルミニウムの約60%, 超高速切削が可能
リサイクル性	自動車, OA・AV部品等	新塊精錬時の数%のエネルギーで再生可能

・自動車のマグネシウム部品



ミラーフレーム



ハンドル



マグネシウム車輪



スピーカー



パワーアンプ



シートフレーム

マグネシウム合金の鉄道車両への応用

ポイントは難燃性マグネシウム合金の開発！



難燃性Mg合金ダイカスト材(鋳造材):
N700系新幹線荷棚部材として採用

■航空機のアプリケーション

航空機用マグネシウム合金への要求特性性能

特性	温度	マグネシウム合金への要求特性性能	
		システム応用	構造用
引張強さ	室温	275～350 MPa	450 MPa
引張耐力	室温	200～300 MPa	350 MPa
伸び	室温	12～16 %	16～18 %
引張耐力	150℃	引張耐力の-10%	引張耐力の-10%
圧縮耐力	室温	引張耐力の±10%	引張耐力の±10%
圧縮下で破壊	室温	5083Al合金に匹敵	2024Al合金T3に匹敵
密度	室温	1.7～1.8	1.7～1.8
残留強度	室温	適応せず	2024Al合金T3に匹敵
疲労き裂伝播	室温	適応せず	2024Al合金T3に匹敵
疲労限 $K_t=1.0, R=0.1$	室温	160 MPa	140 MPa

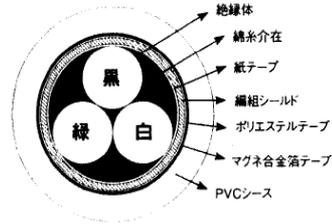
振動吸収性を利用したアプリケーション



9万9750円(1本)

低域用: 14.5 cmコーン型スピーカー
 高域用: 1.9 cmドーム型スピーカー

Hi-Fiスピーカーの振動板にマグネシウム合金を採用



マグネシウムワイヤーを芯に利用した音響ケーブル (JF Ssounds)

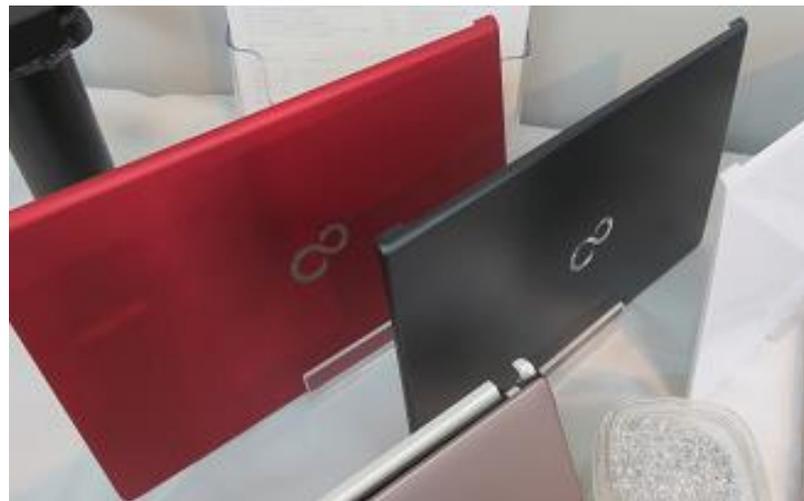
マグネシウム箔を利用した音響ケーブル(TIGLON)



■耐くぼみ、電磁波シールド性を利用したアプリケーション



ノートパソコン筐体



デジタルカメラ筐体

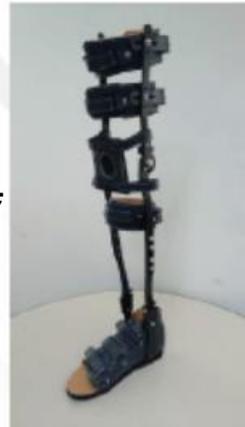


アタッシュケース

軽量、生体適合性を利用した福祉医療機器へのアプリケーション



義肢装具



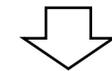
杖



車椅子



生体材料



実用化に向けた研究開発・プロジェクトの増加

■その他のアプリケーション:放熱性を利用したアプリケーション

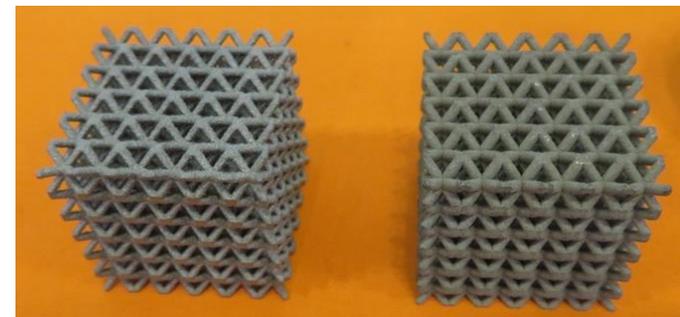
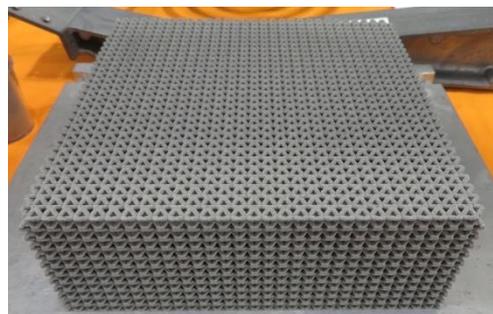


LEDライト用放熱フレーム



調理器具(左:炊飯器内蓋、右:フライパン ※韓国製)

■難燃性マグネシウム合金を使用した3Dプリンターによる積層造形アプリケーション



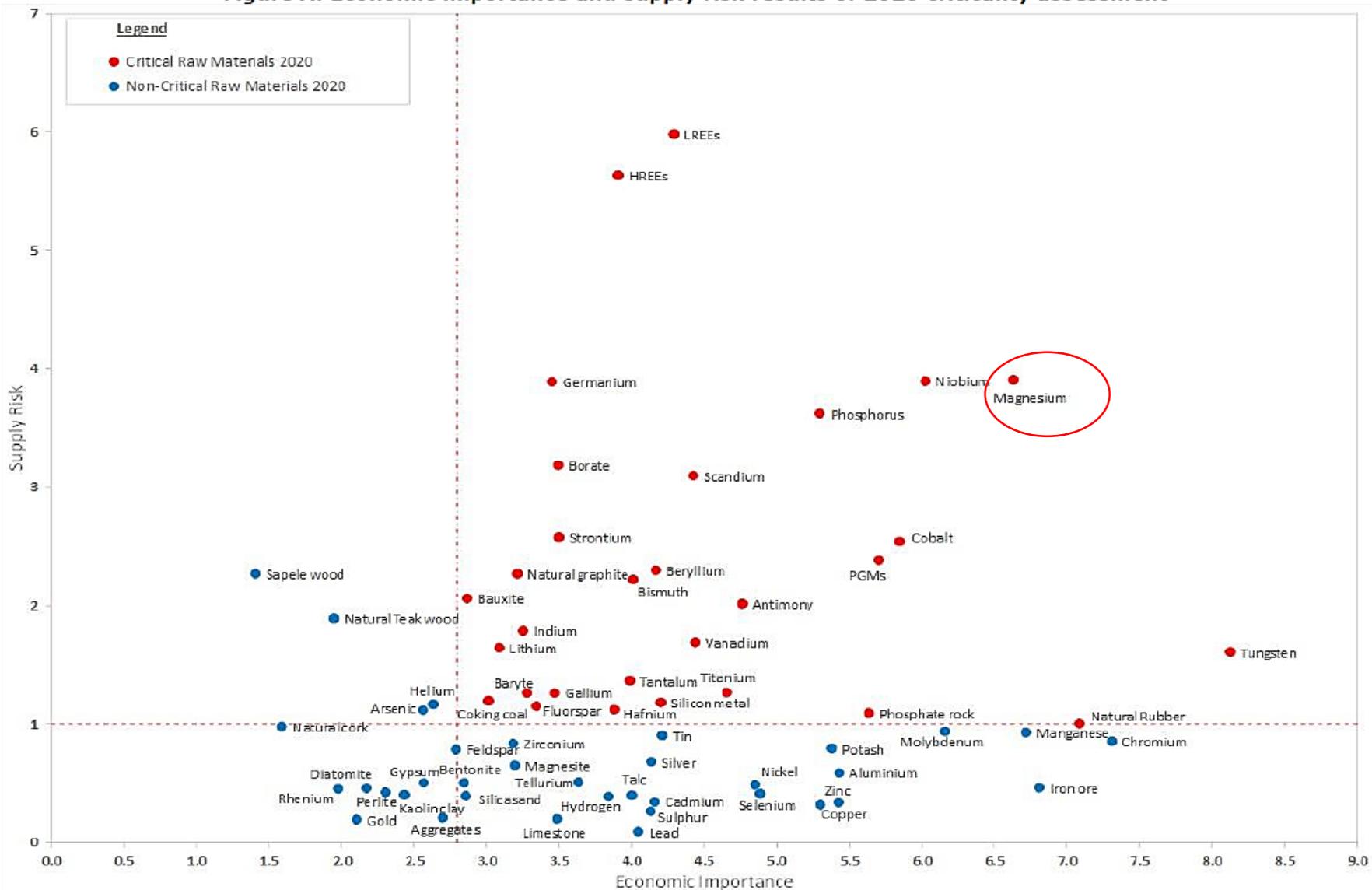
目次

1. はじめに
2. マグネシウムの製造法
3. マグネシウムの特性
4. マグネシウムの需給動向
5. マグネシウムの用途例紹介
6. 今後の展開



EUで実施された素材の経済的重要性、供給リスク評価調査結果

Figure A: Economic importance and supply risk results of 2020 criticality assessment



出典:EUROPEAN COMMISSION ;Study on the review of the list of Critical Raw Materials Final Report



世界のマグネシウム製錬計画（中国除く）

国	企業名	場所	製錬法	原料	生産規模	備考
オーストラリア	Latrobe Magnesium	Victoria Latrobe Valley	ケイ素還元法	石炭灰 ドロマイト	2025年1月 10千t	2,300万ドルの融資枠を確保 7.35kgCO2eq/kg
	Magnium	Western Australia	炭素還元法		2026年90-120t	1.45-1.46kgCO2eq/kg
	Corab Resources(AusMag)	Winchester		マグネサイト	5万トンを予定	計画中
マレーシア	Latrobe Magnesium	Sarawak州 Samalaju工業団地	ケイ素還元法	ドロマイト?	100千トン	水力発電を利用、FeSiメーカー有り
カナダ	Tergeo Critical Minerals	Quebec	電解法	蛇紋岩	2025年25千t リサイクル12千t SiO2 44千t	1.35kgCO2eq/kg Mg (水力)
	Mag One Products	Vancouver	アルミ還元法 (マイクロ波加熱方式)	アスベスト残滓等から 酸化マグネシウム	パイロットプラント 5千t→20千t	総予算360万ドル5-8 kgCO2eq/kg
	West High Yield Ressources	British Columbia				計画中 MgOの生産
ルーマニア	Verde Magnesium	Brownfield mine	炭素還元法	ドロマイト	2025年 2千t 2030年後 60-90千t	エコマグネ
	Mures Magnesium	Transylvania	電解法	マグネシウム化合物 ドロマイト	2023-2024、 40tパイロットプラント	グリーンエネルギー
ボスニア	Magnesium for Europe	Kanton 10	アルミ還元法	ドロマイト	15千tから50千トンに 拡張可能	23年末に40トンの試験操業を予定
サウジアラビア	NEOMプロジェクト	不明	電解法	海水淡水化後の濃縮 海水	2028年に16万トン	サウジアラビアの大型開発プロジェクト計画中
アメリカ	Western Magnesium Corporation	Nevada	ケイ素還元法	ドロマイト	25千t	パイロット生産から商業生産に移行
	Big Blue Technologies	Colorado	炭素還元法/ アルミ還元法	ドロマイト	試験設備:5kg/hr	0.5-15 kg CO2eq/kg Mg
	Magrathea Metals	San Francisco	電解法	海水		米国国防総省(DOD)と2,800万ドルの官民パートナーシップを締結
韓国	Dain Light Metal	全羅南道	電解法	Ni製錬スラグ	6万トンの生産を予定	国プロとして国が21億円出資し、2023年から2027年末までの5年間で0.5トン電解炉を構築しマグネシウムを生産



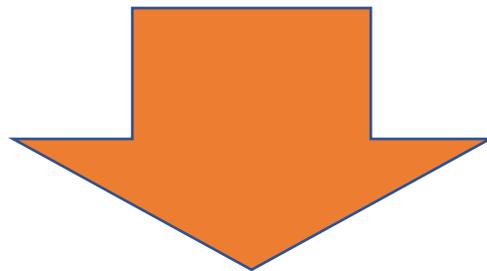
「NEDO先導研究プログラム/新技術先導研究プログラム」

濃縮海水を原料とするMgのグリーン 新製錬技術開発

事業期間:2021年6月～2024年3月

関西大学、東京大学、株式会社戸畑製作所、産業技術総合研究所、日本マグネシウム協会

研究成果を発展



海水や濃縮海水を原料とする国内でのマグネシウム生産実現のため、新たな事業化に向けたプロジェクトを計画中！！



ご聴講ありがとうございました。

国内におけるマグネシウムサプライチェーンの強靱化を図るため、海水中のマグネシウムを原料にした国内でのマグネシウム生産の実現に向けて、研究開発、実用設備の構築などを図っていきたいと考えておりますので、ご支援、ご協力のほどお願いいたします。

御遠慮なく、ご連絡をいただければ幸いです。

一般社団法人日本マグネシウム協会
〒104-0031 東京都中央区京橋3-5-3 竹河岸ビル6F
TEL 03-3538-1280
FAX 03-3538-1285
E-mail office@magnesium.or.jp
HP <http://magnesium.or.jp/>



Salt & Seawater Science Seminar 2024

海水から未来を創る～製塩工程溶液からのマグネシウム回収と利用～

講演2

カーナライト晶析を利用した

高純度塩化マグネシウム回収技術



公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所
邑上 泰平

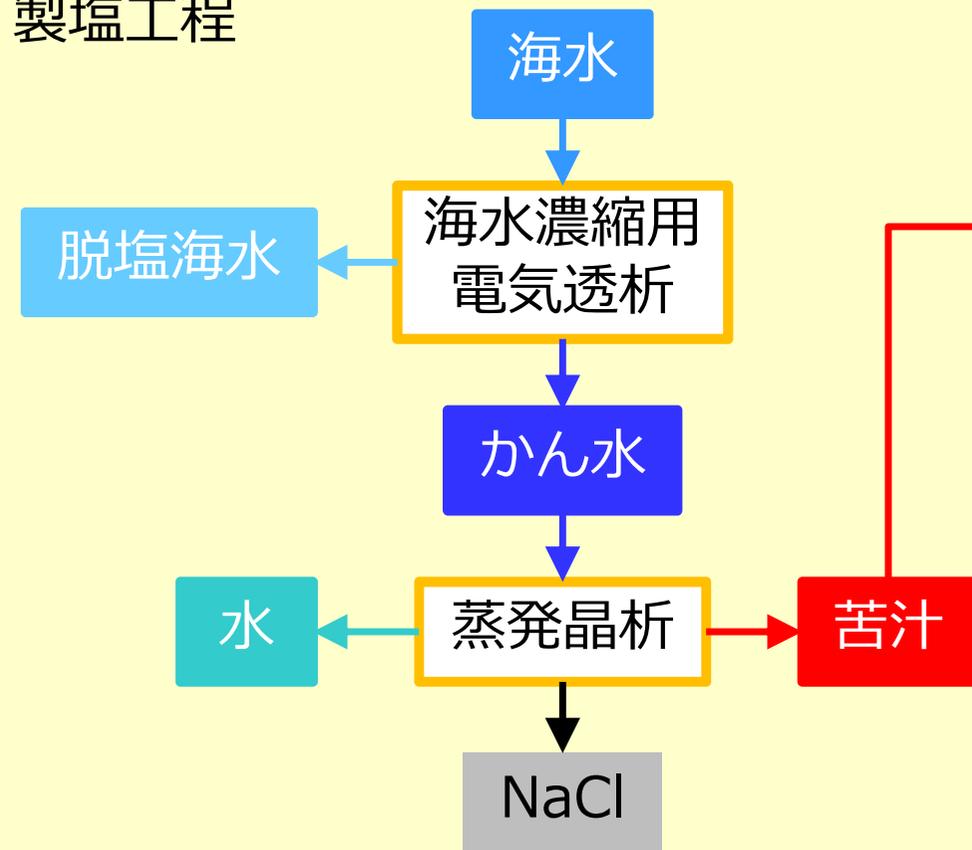
1. イオン交換膜法製塩の概要

2. カーナライト晶析を利用した高純度塩化マグネシウム回収技術

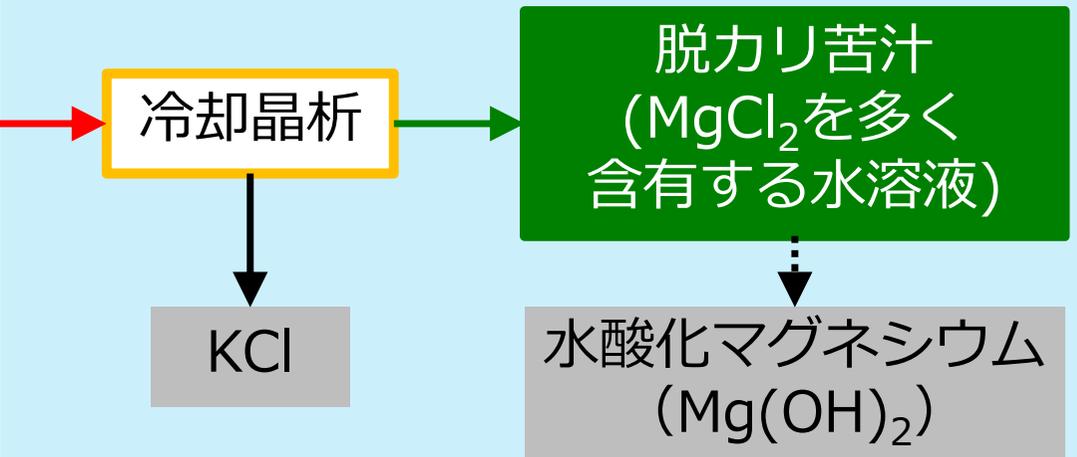
イオン交換膜法製塩の工程フロー

製塩工程では塩化ナトリウム(NaCl)、水、苦汁を、苦汁処理工程では、塩化カリウム(KCl)、脱カリ苦汁(MgCl₂を多く含有する水溶液)を得ることができる

製塩工程



苦汁処理工程

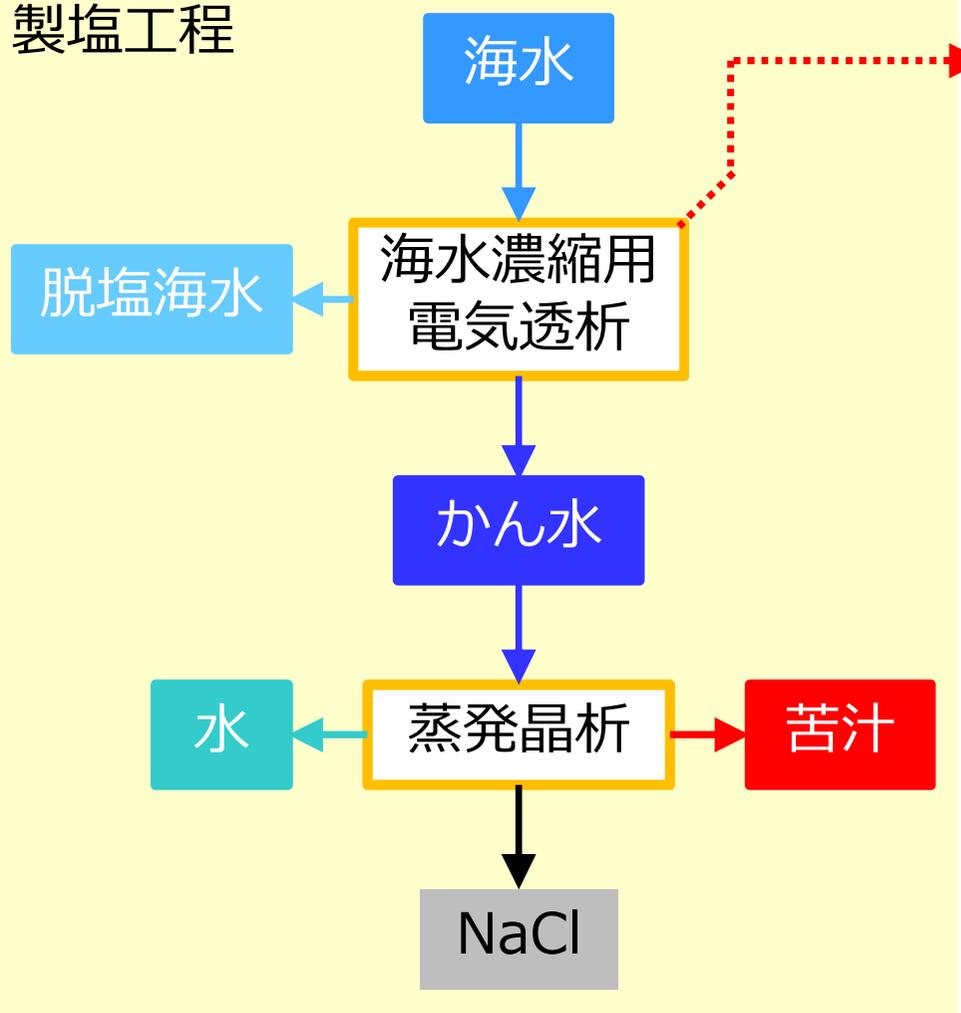


講演3

製塩苦汁から得られる水酸化マグネシウムの高純度化に関する検討

イオン交換膜電気透析の原理

製塩工程

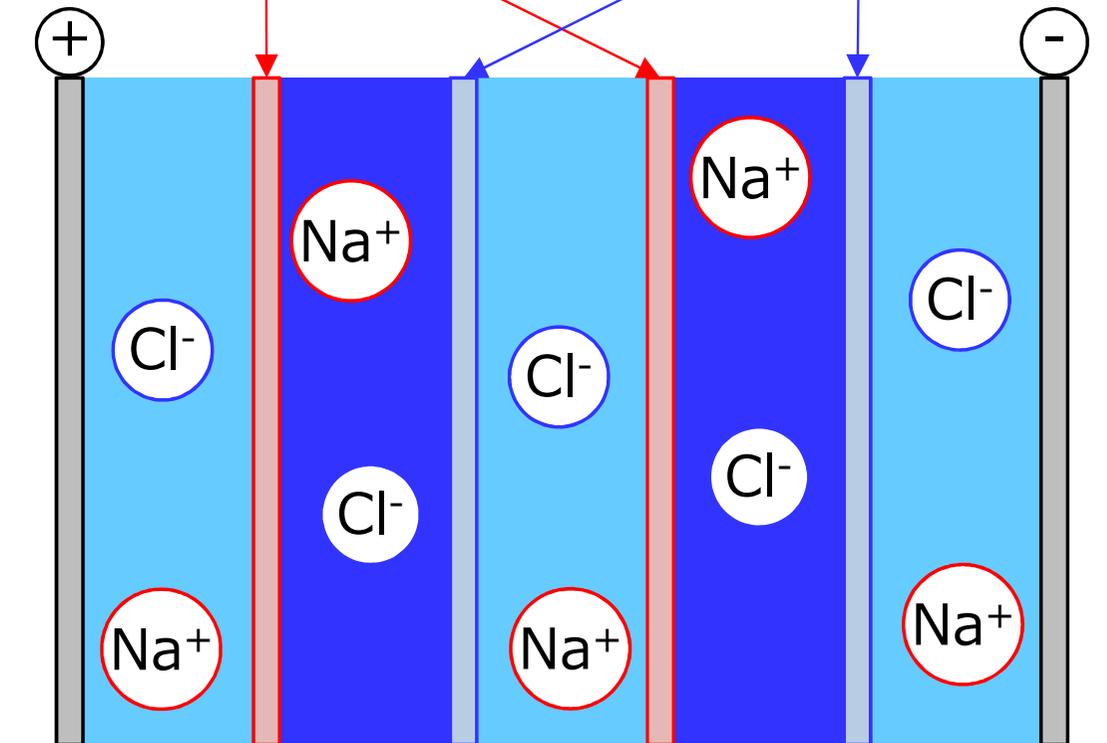


陽イオン交換膜
→陽イオンのみ透過

陰イオン交換膜
→陰イオンのみ透過

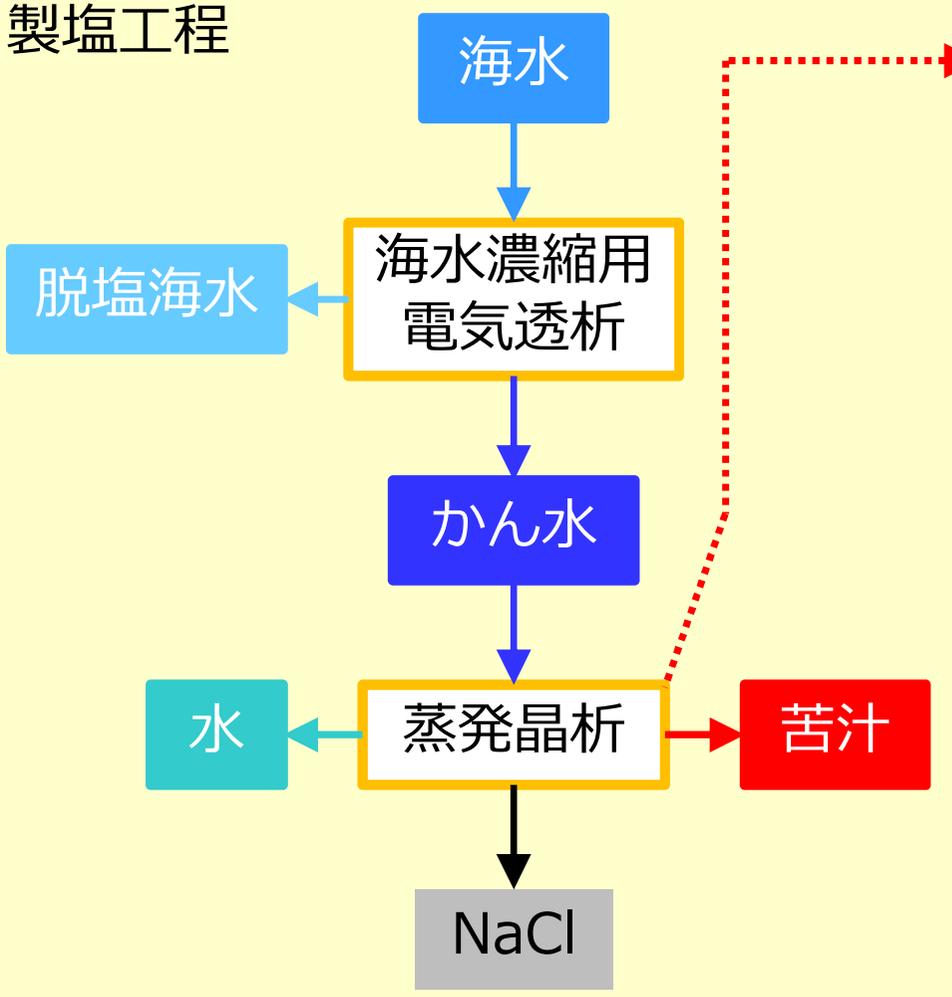
陽極
+

陰極
-



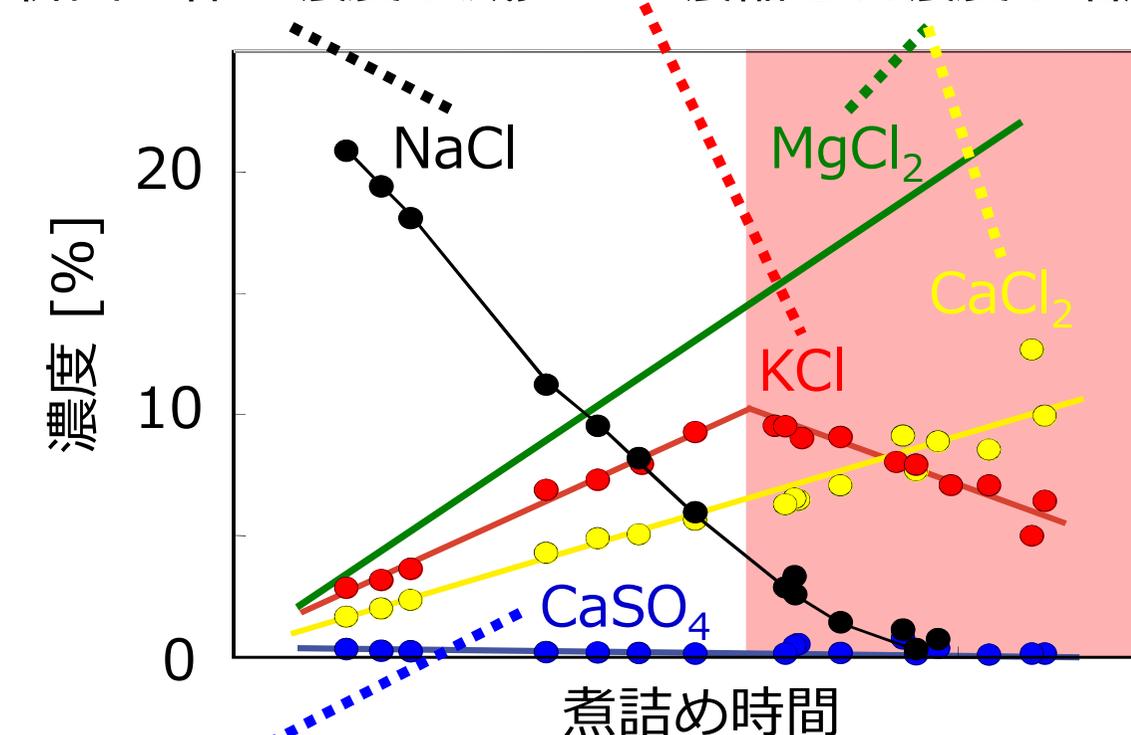
かん水の濃縮挙動

製塩工程



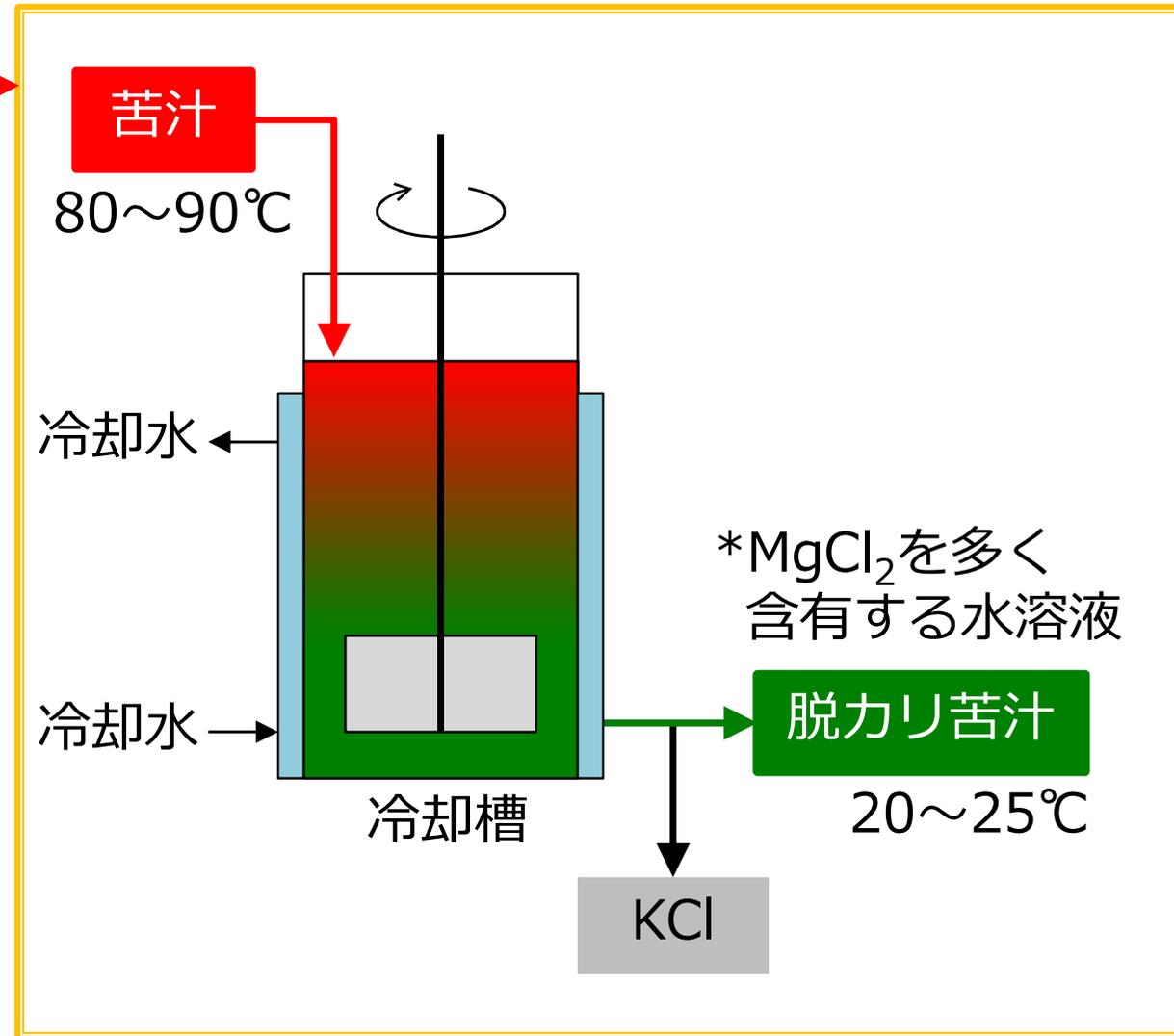
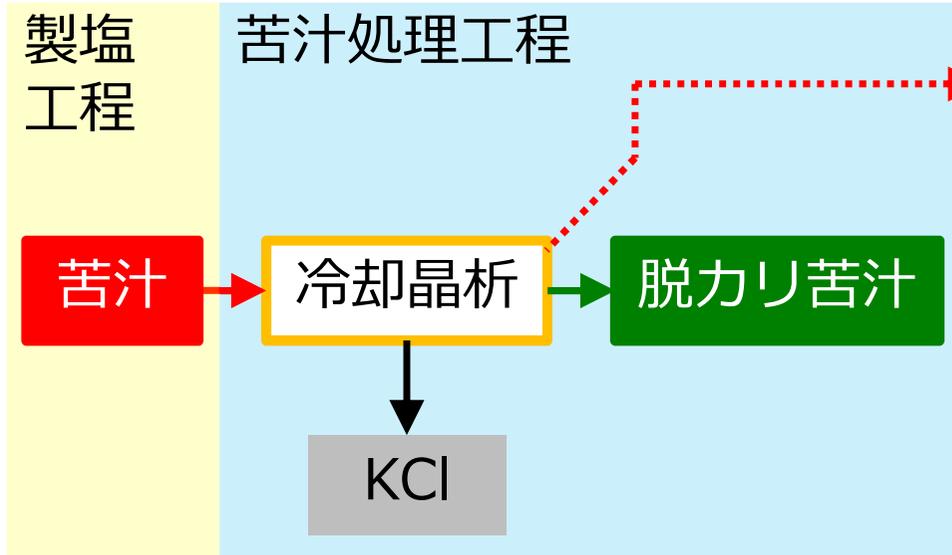
溶解度を超えると、析出に伴い濃度が減少
KCl析出点を煮詰め終点として、苦汁を排出

析出に伴い濃度が減少 濃縮され濃度が増加



溶解度が非常に低い

塩化カリウム (KCl) の回収方法



製塩工程溶液の分析値

[%]

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	Cl ⁻	Total
海水	0.04	0.13	0.04	1.0	0.26	0.01	1.9	3.38
かん水	0.14	0.21	0.34	6.7	0.04	0.06	11.5	18.99
苦汁	2.3	3.4	5.5	2.6	0.03	1.0	22.5	37.33
脱カリ苦汁	2.5	3.7	2.1	2.3	0.03	1.1	20.2	31.93

苦汁と脱カリ苦汁には海水由来のMg²⁺が濃縮されており、
現在は脱カリ苦汁がMgCl₂・6H₂Oなどの原料として利用されている

⇒脱カリ苦汁はCa²⁺, K⁺, Na⁺を多く含有しており、
Mg塩製品の高純度化にはこれらの分離が重要である

1. イオン交換膜法製塩の概要

2. カーナライト晶析を利用した高純度塩化マグネシウム回収技術

カーナライトとは

- KClとMgCl₂の複塩（化学式 KCl・MgCl₂・6H₂O）
- カリ(K)肥料を回収する原料などに用いられる



©Jeff Weissman/Photographic Guide to Mineral Species

カーナライトの写真

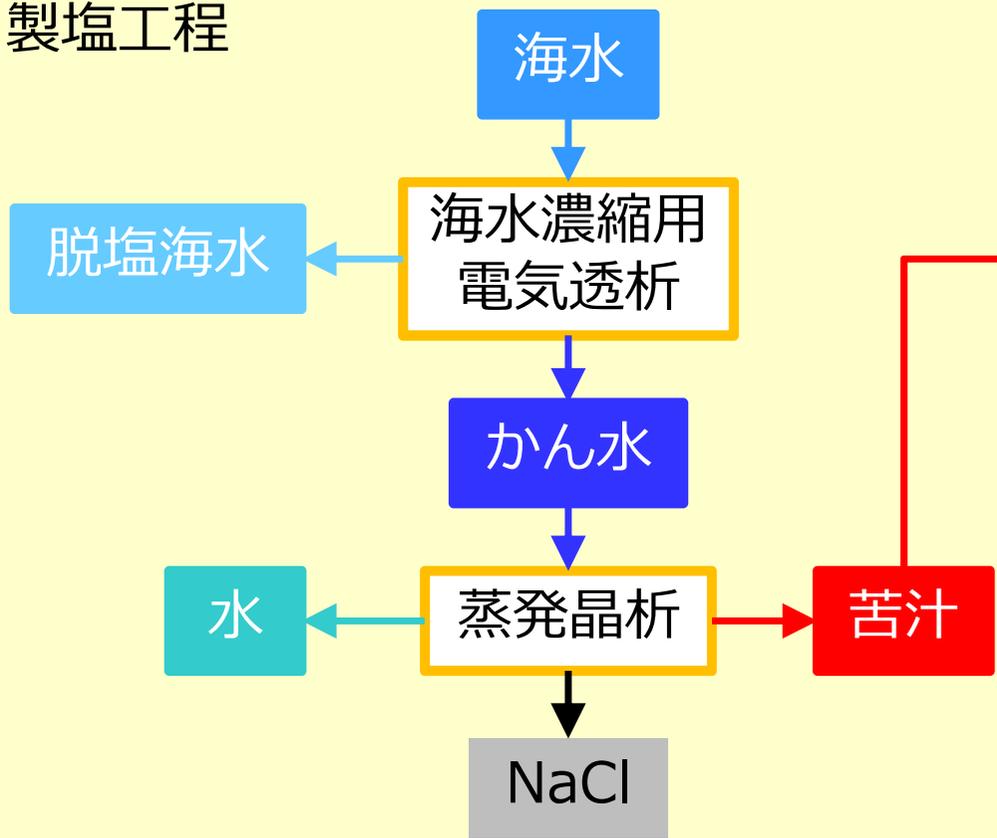


苦汁からカーナライトを析出させた後、MgCl₂とKClに分離すれば、高純度MgCl₂が回収できると考えた

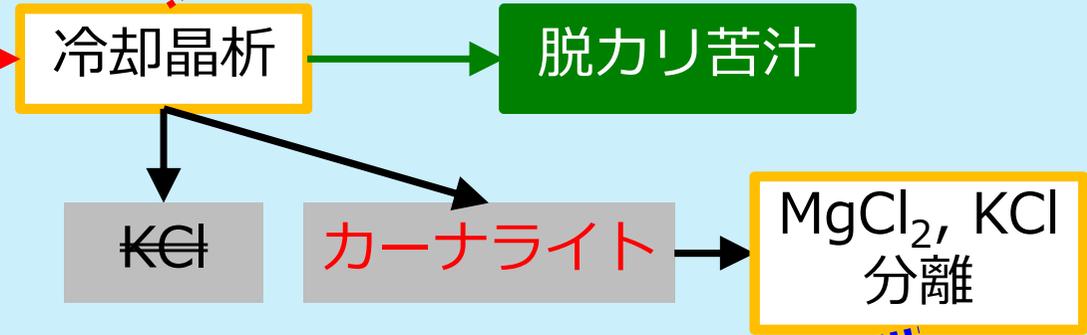
Point 1

冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

製塩工程



苦汁処理工程



Point 2

カーナライトをMgCl₂とKClに分離する

1) 邑上泰平, 加留部智彦, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, 73, 125 (2019)

2) 特開2020-049471

1. イオン交換膜法製塩の概要

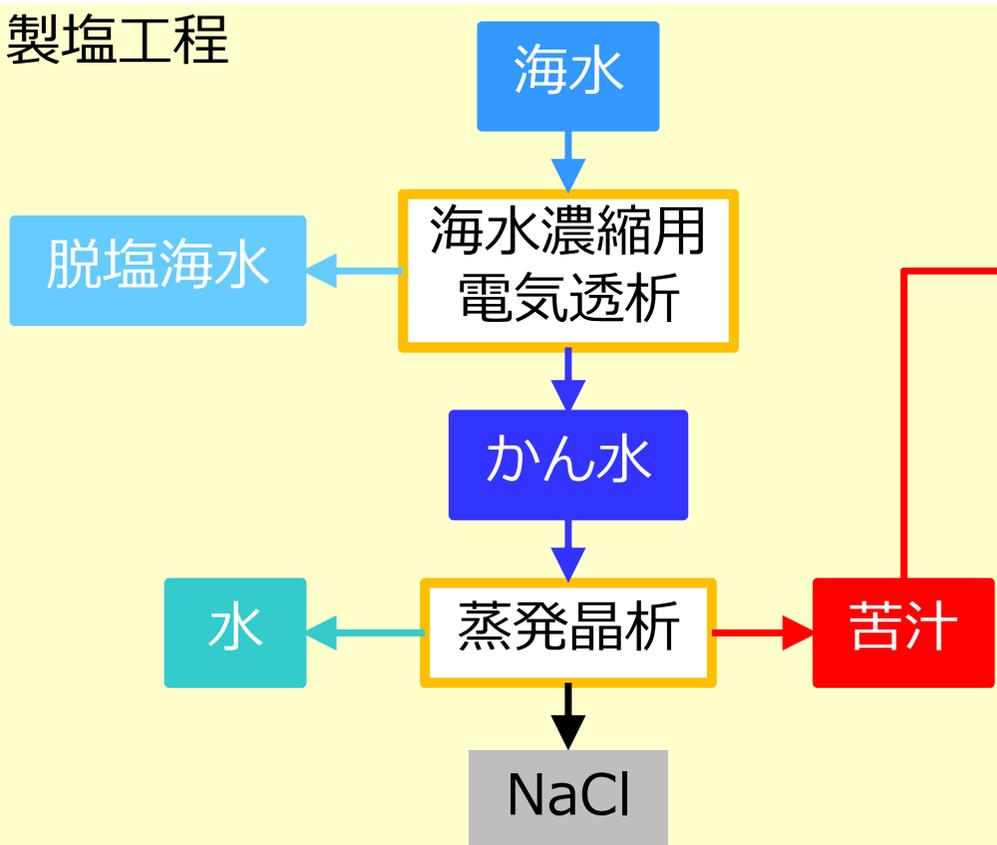
2. カーナライト晶析を利用した高純度塩化マグネシウム回収技術

Point 1 : 冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

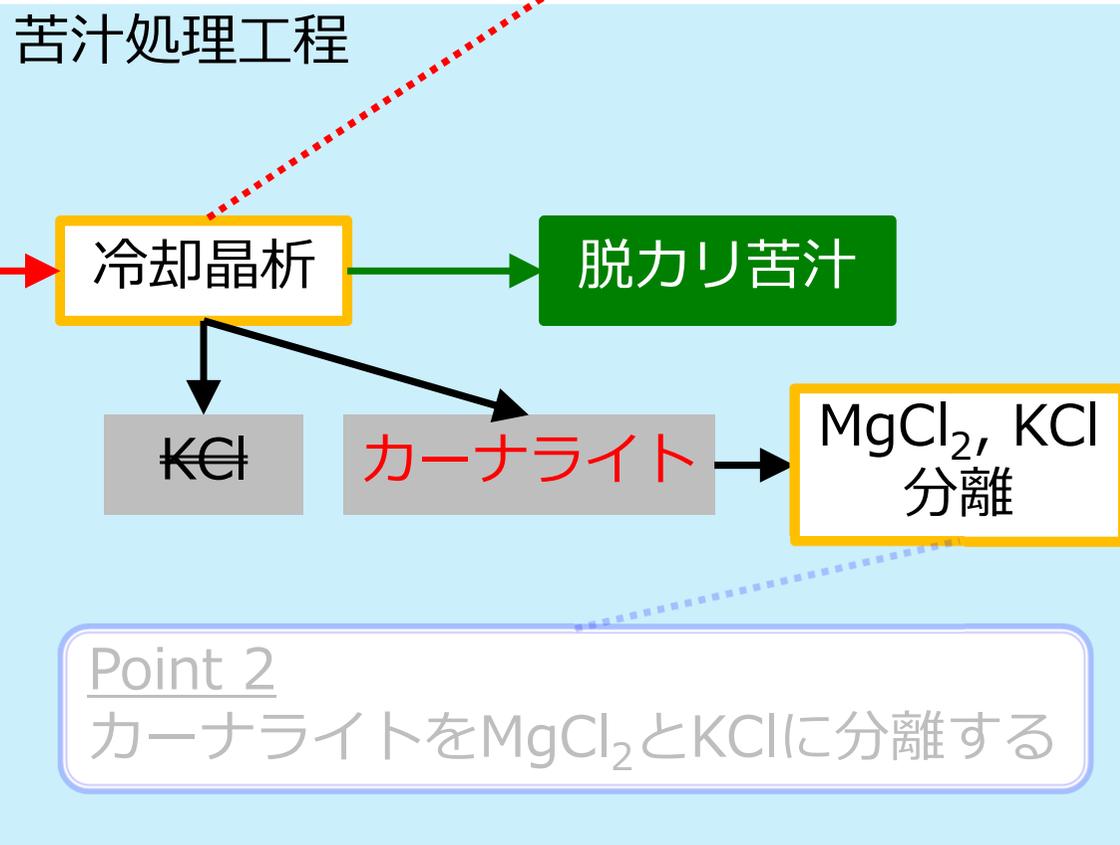
Point 2 : カーナライトを MgCl_2 と KCl に分離する

Point 1
冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

製塩工程



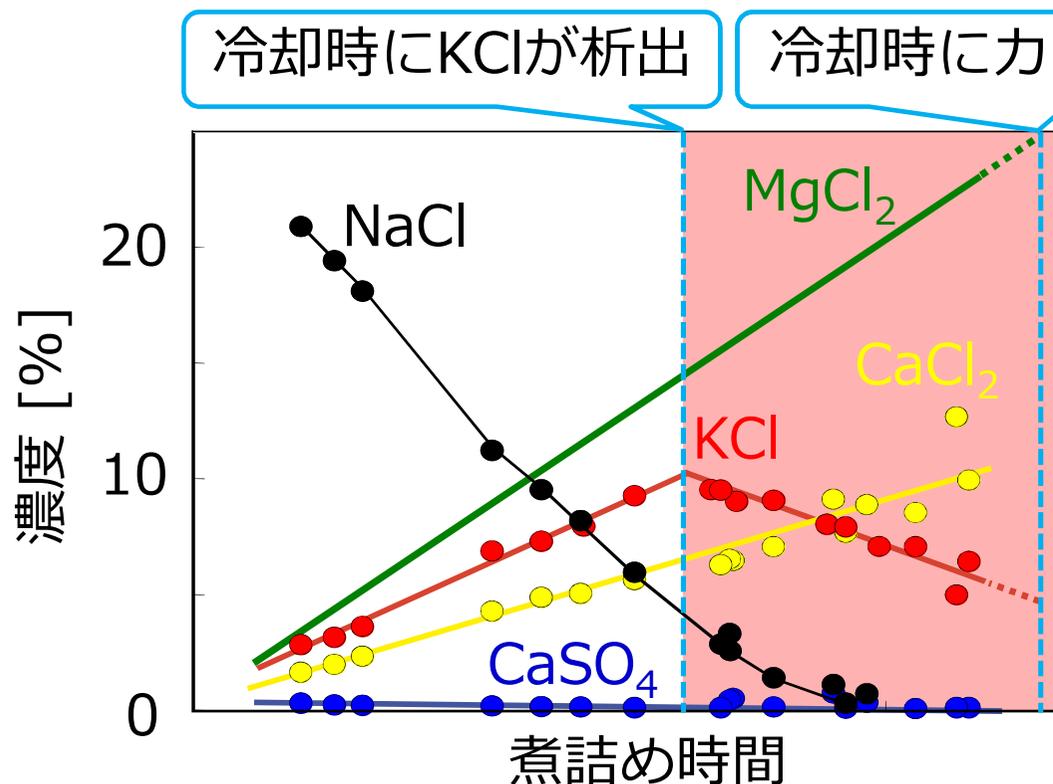
苦汁処理工程



Point 2
カーナライトをMgCl₂とKClに分離する

1) 邑上泰平, 加留部智彦, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, 73, 125 (2019)

2) 特開2020-049471



苦汁の濃縮度が高いとカーナライトが析出する¹⁾
 ⇒ K^+ 濃度に対する Mg^{2+} 濃度が高いとカーナライトが析出する

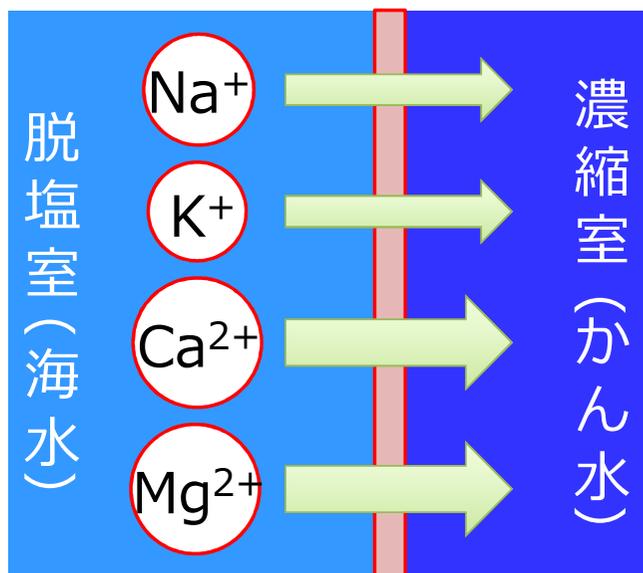


苦汁の Mg^{2+}/K^+ 濃度比を高めれば、カーナライトが析出すると期待される

苦汁の組成を決定づけるかん水の Mg^{2+}/K^+ 濃度比を高めれば、冷却晶析工程でカーナライトを回収できると考えた

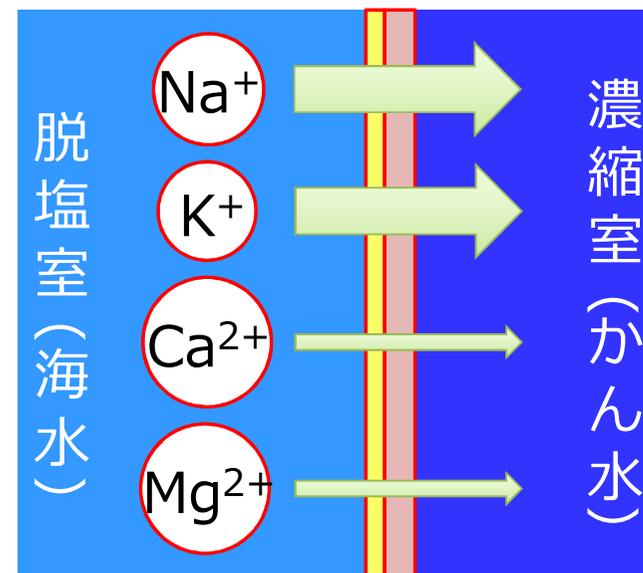
1) 松尾哲男, 武田明子, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, 25, 129-141 (1971)

かん水の Mg^{2+}/K^{+} 濃度比を高める方法



一般的な陽イオン交換膜（一般膜）

1価陽イオンよりも
2価陽イオンが透過しやすい

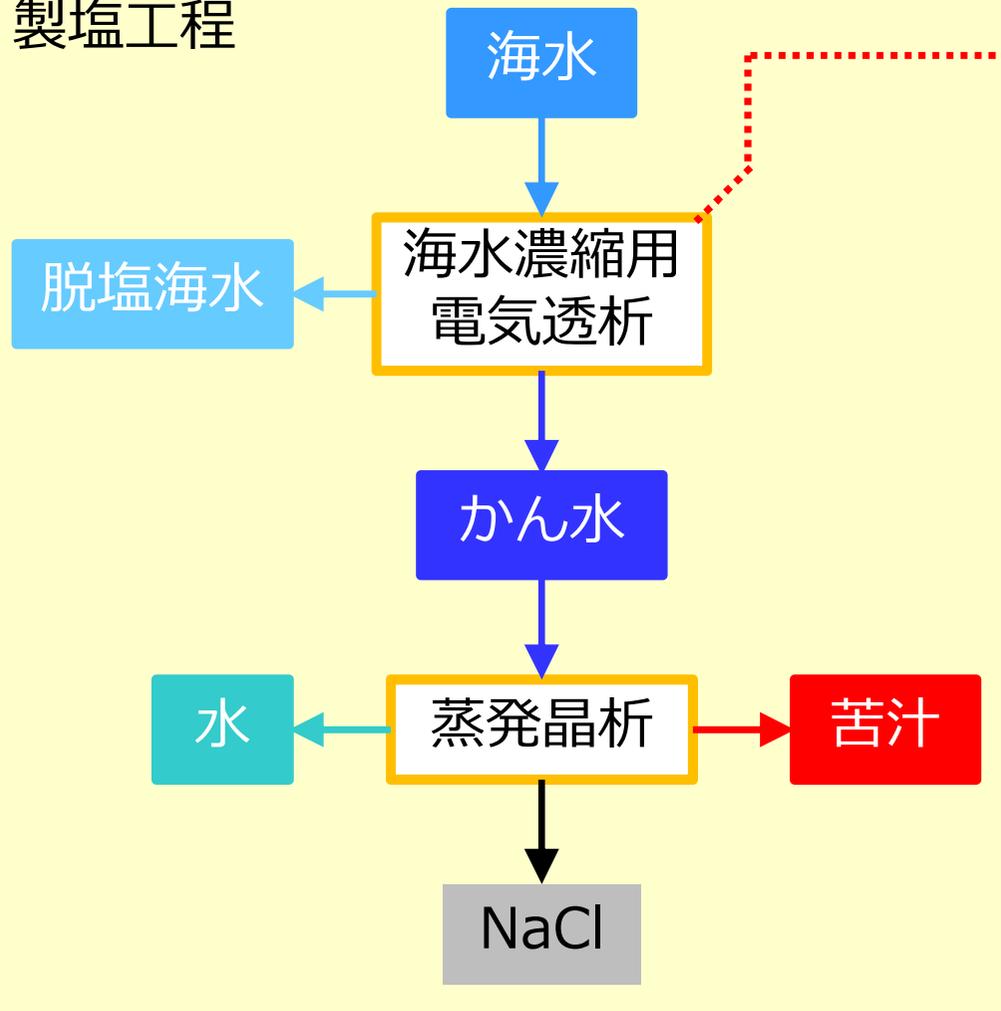


製塩用陽イオン交換膜（製塩用膜）

2価陽イオン難透過性能があり、
1価陽イオンが透過しやすい

⇒海水濃縮時に製塩用膜と一般膜を併用し、一般膜の割合を高めれば
かん水の Mg^{2+}/K^{+} 濃度比が増加する

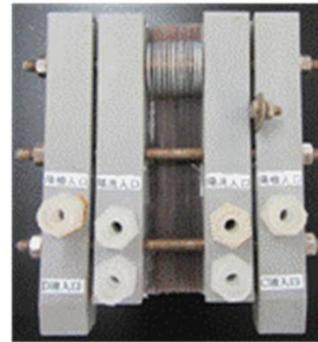
製塩工程



製塩用膜と一般膜の割合を変化させた電気透析装置を用いて海水濃縮試験を実施した
→一般膜の割合がかん水の組成に与える影響を検討した

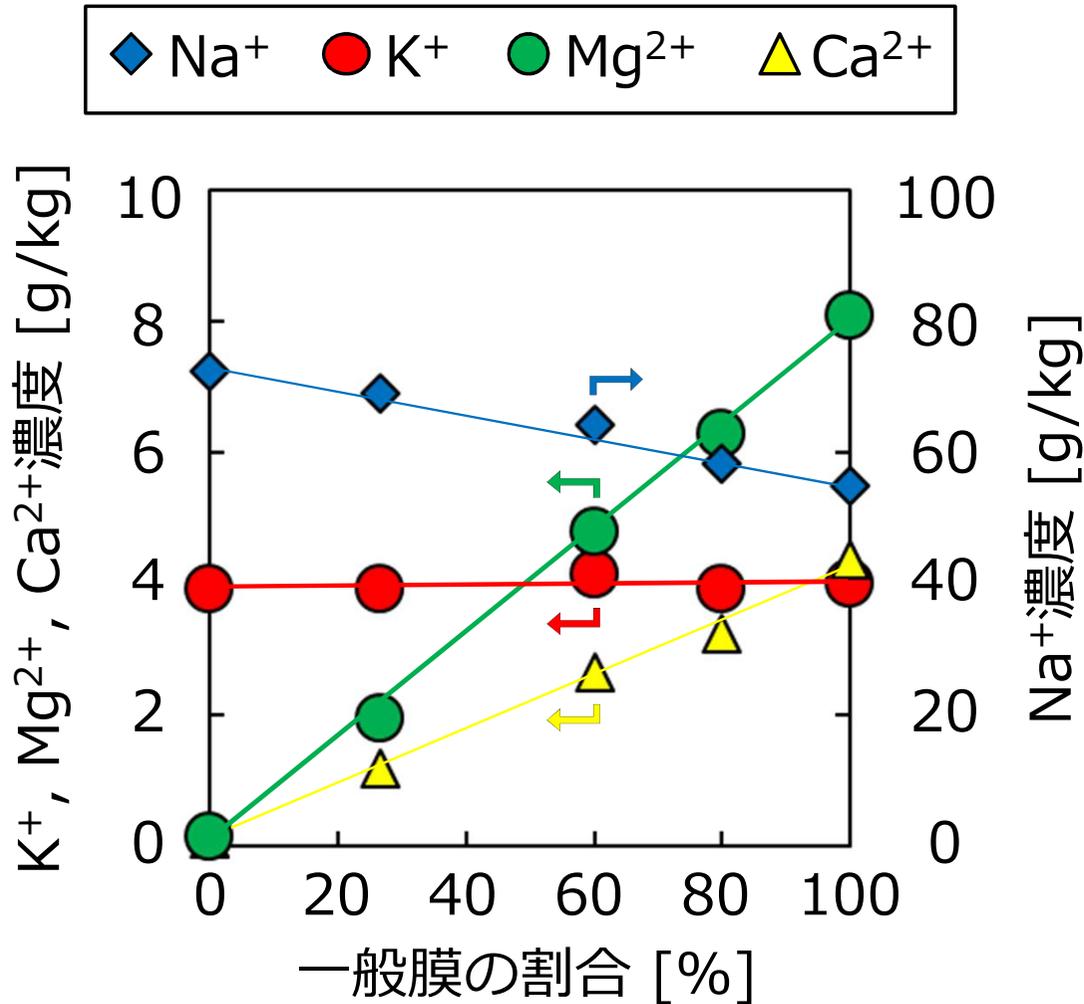
透析条件

- ・電流密度 : 3 A/dm²
- ・透析温度 : 25℃
- ・有効膜面積 : 0.3 dm²/対
- ・膜対数 : 15対



電気透析槽 DW-Lab
(AGCエンジニアリング(株)製)

一般膜の割合と各陽イオン濃度との関係



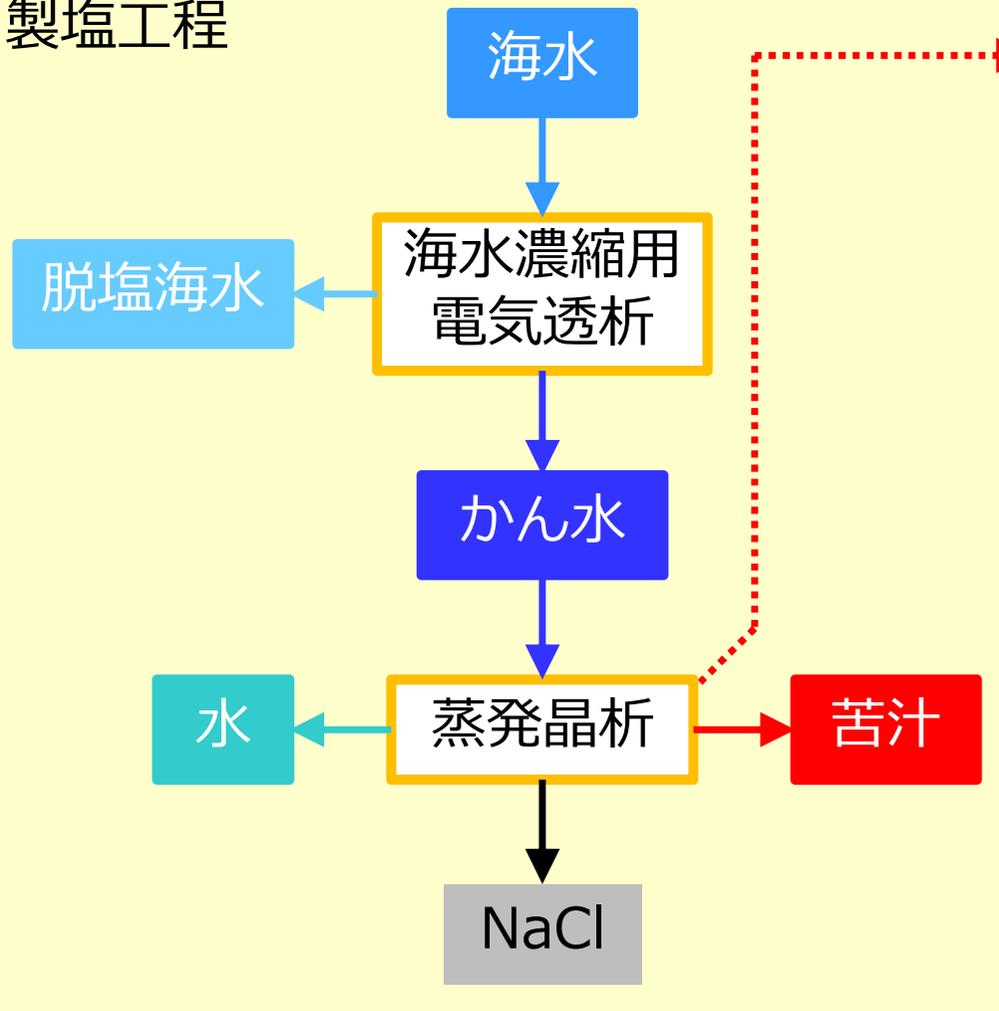
- かん水のMg²⁺濃度は、一般膜の割合が高いほど高くなった
- かん水のK⁺濃度は、一般膜の割合に依存せず概ね一定



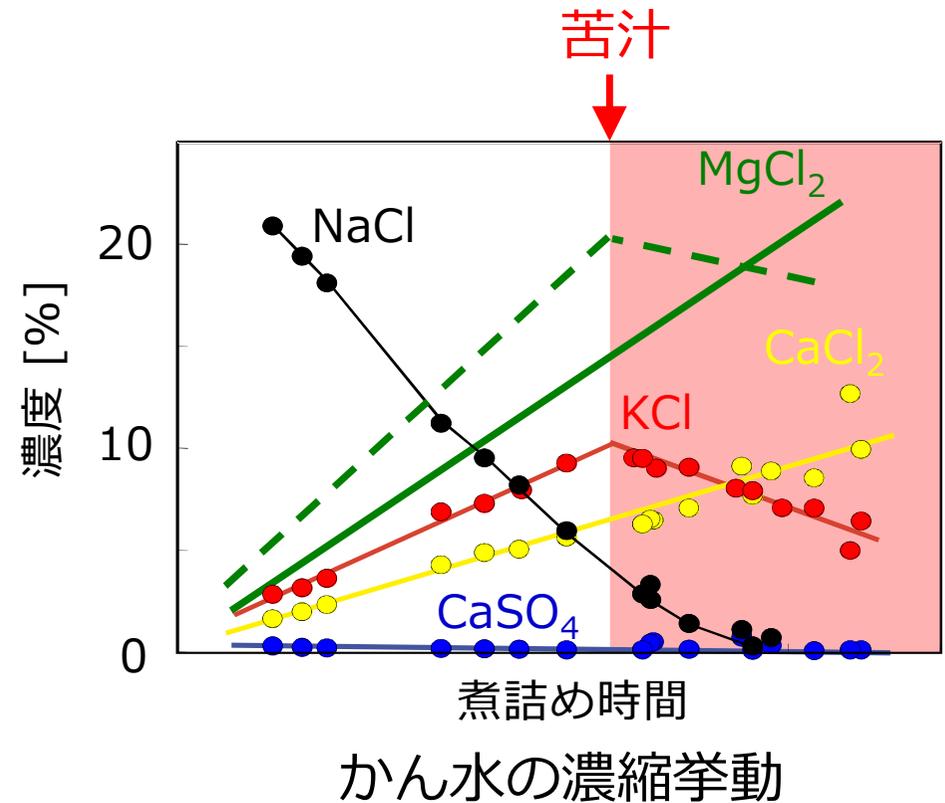
一般膜の割合を増加させることで、**かん水**のMg²⁺/K⁺濃度比を高めることができる

蒸発濃縮試験

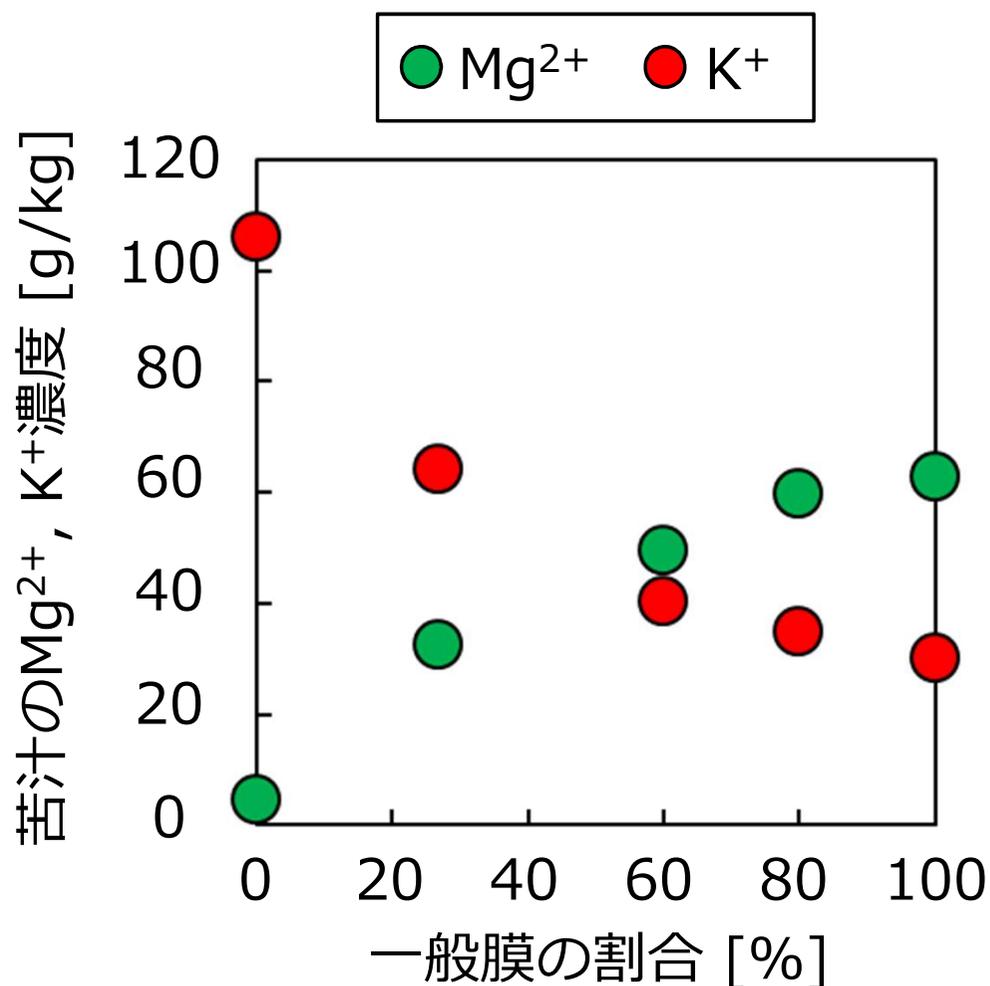
製塩工程



海水濃縮試験で得たかん水に相当する種々の調製かん水を蒸発濃縮(90℃)し、 K^+ 濃度が減少した時点の溶液(苦汁)の組成を計測した



一般膜の割合と苦汁の Mg^{2+} 、 K^+ 濃度との関係



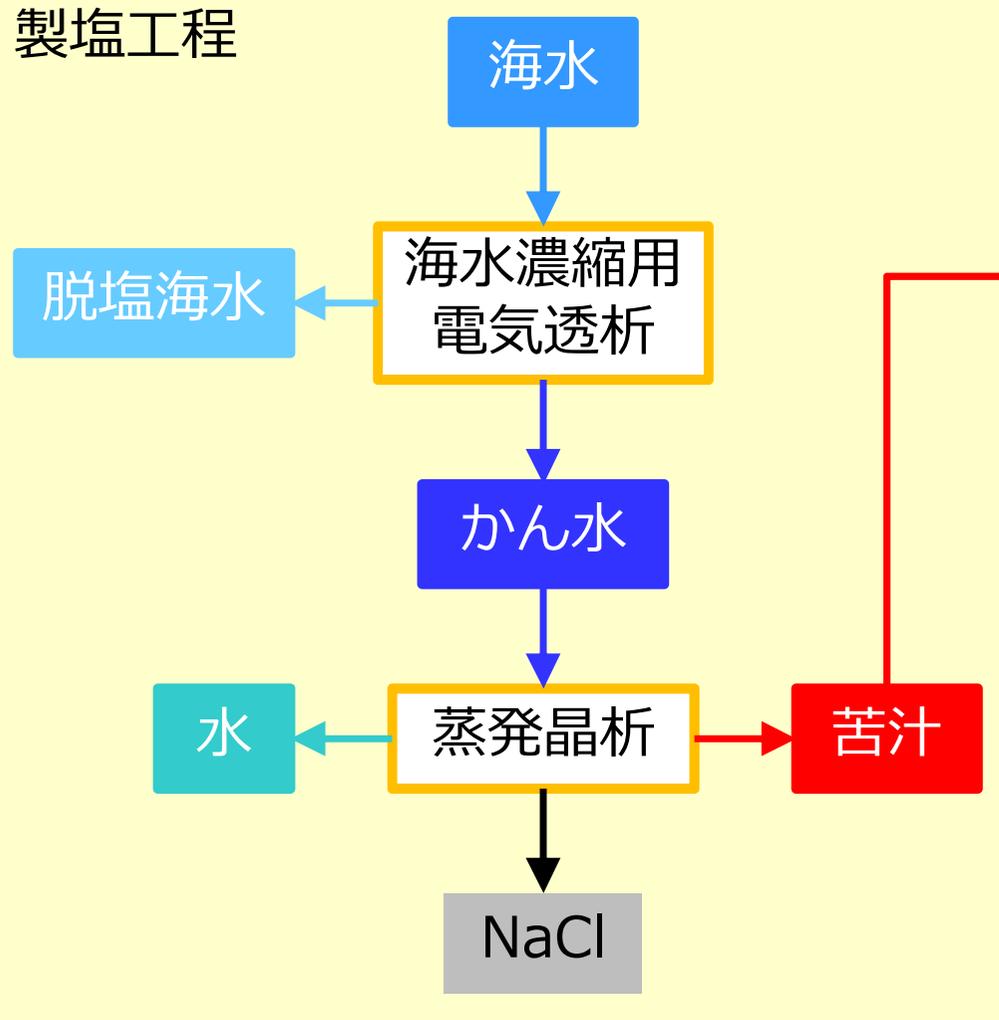
- 苦汁の Mg^{2+} 濃度は、一般膜の割合が高いほど高くなった
- 苦汁の K^+ 濃度は、一般膜の割合が高いほど低くなった



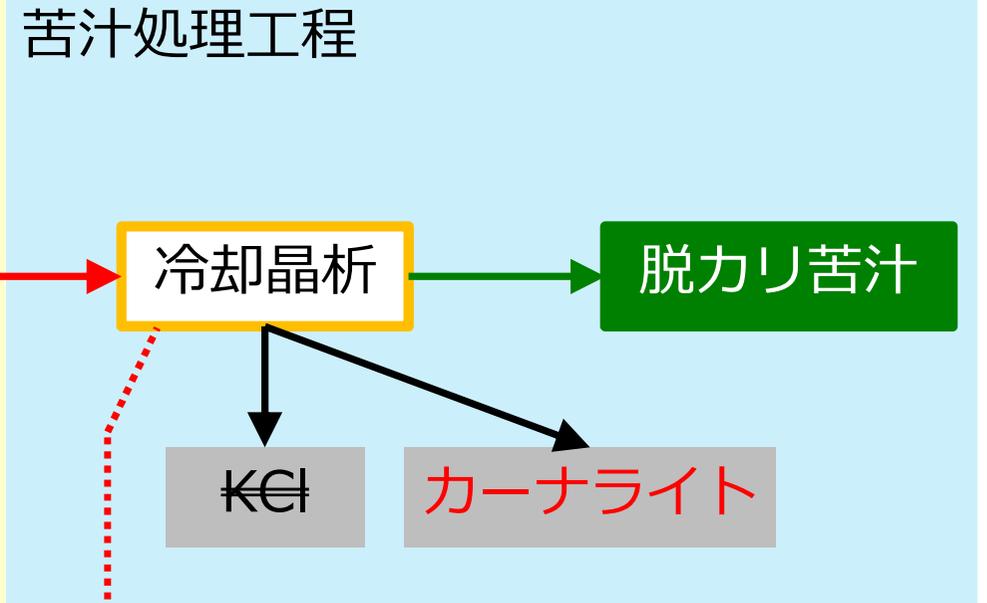
海水濃縮時に一般膜/製塩用膜の割合を増加させることで、**苦汁**の Mg^{2+}/K^+ 濃度比を高めることができる

冷却晶析試験

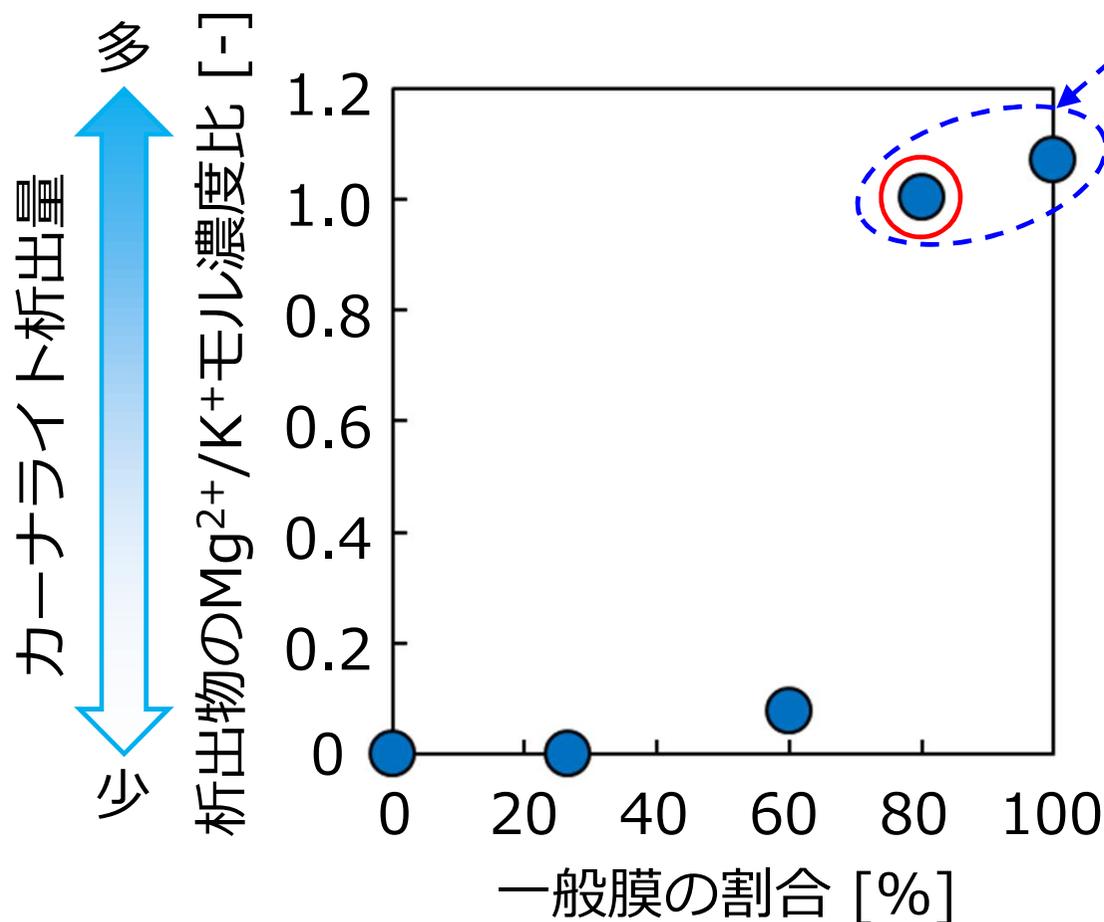
製塩工程



苦汁処理工程



蒸発濃縮試験で得た**苦汁**に相当する種々の調製苦汁を90℃から25℃まで冷却し、析出物の成分分析を実施した



カーナライトが析出
($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)

析出物の Mg^{2+}/K^{+} モル濃度比は、一般膜の割合が60%を超えると著しく増加し、80%付近では概ね1を示した



海水濃縮時に一般膜/製塩用膜の割合を増加させることで、**苦汁**からカーナライトを析出させることができる

[%]

Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	Cl ⁻	H ₂ O
0.44	9.0	13.2	0.8	0.03	0.48	40.0	36.1

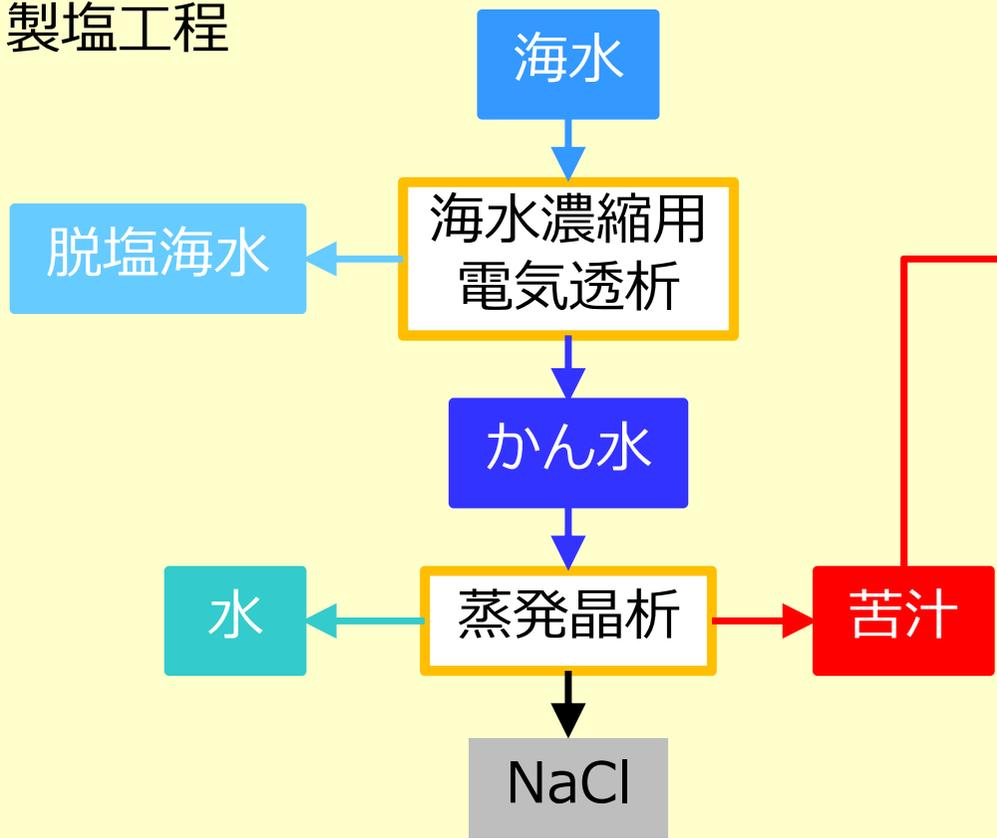
※苦汁からカーナライトへのMg²⁺の回収率は約30%

カーナライトを析出させることで、
苦汁からMg²⁺, K⁺, Cl⁻を選択的に回収できる

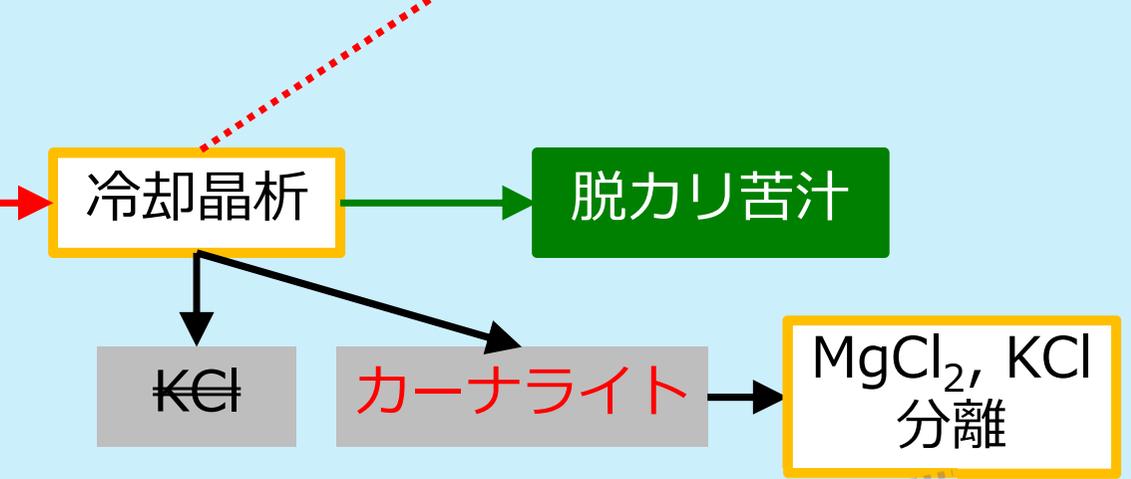
達成

Point 1
冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

製塩工程



苦汁処理工程



Point 2
カーナライトをMgCl₂とKClに分離する

1) 邑上泰平, 加留部智彦, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, 73, 125 (2019)
2) 特開2020-049471

1. イオン交換膜法製塩の概要

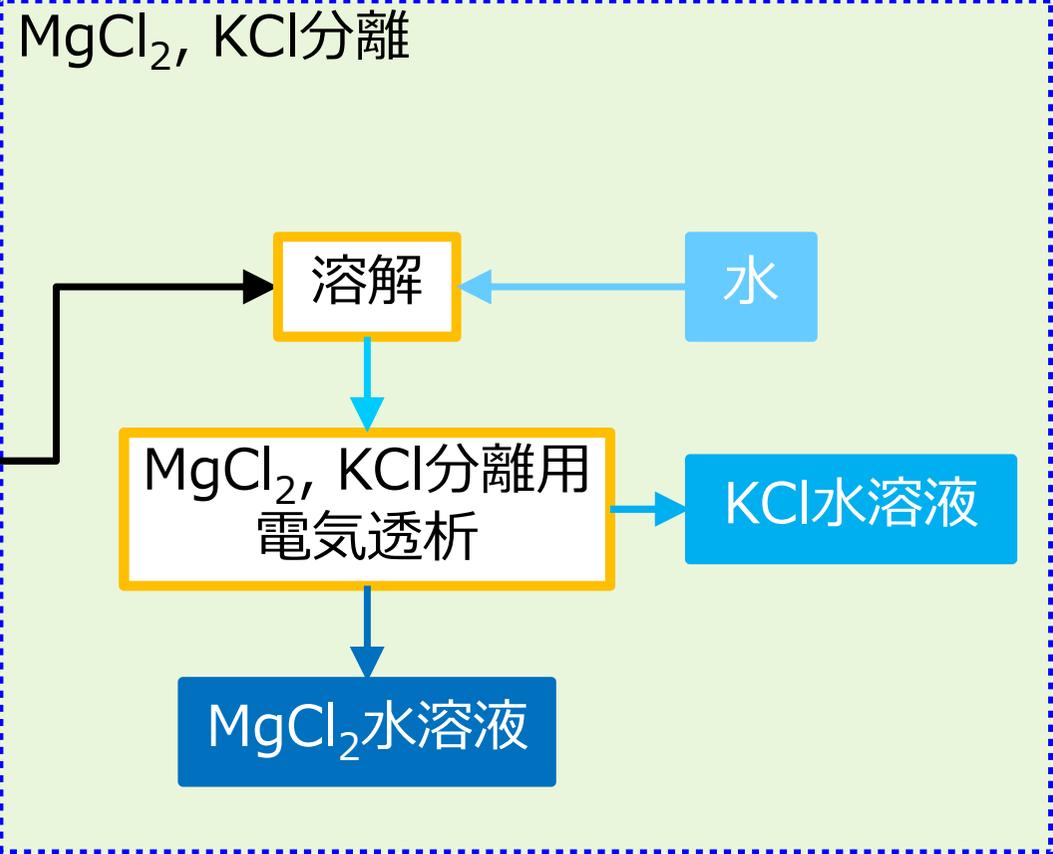
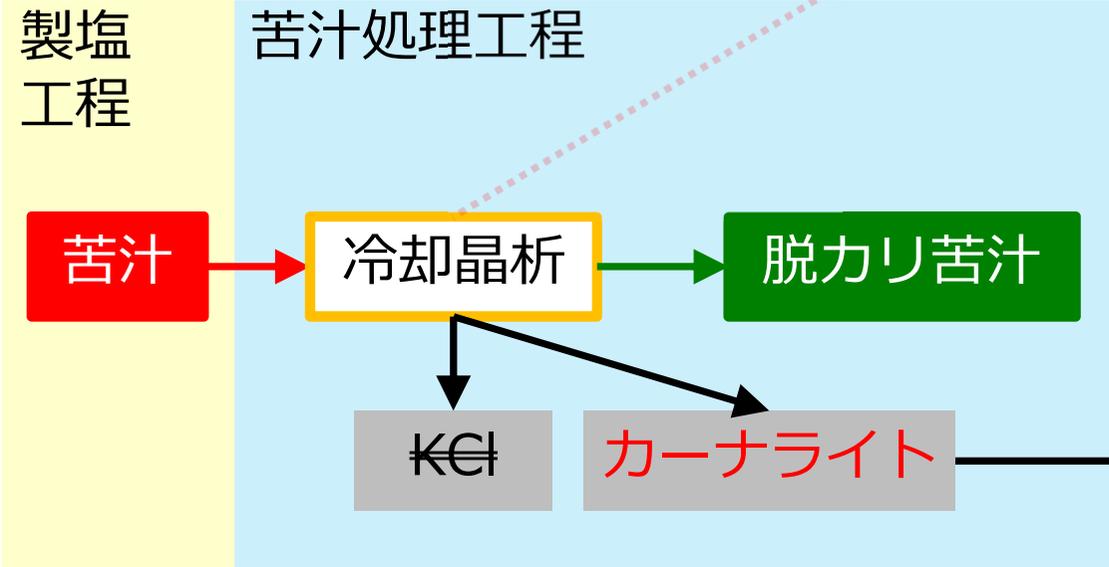
2. カーナライト晶析を利用した高純度塩化マグネシウム回収技術

Point 1 : 冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

Point 2 : カーナライトを MgCl_2 と KCl に分離する

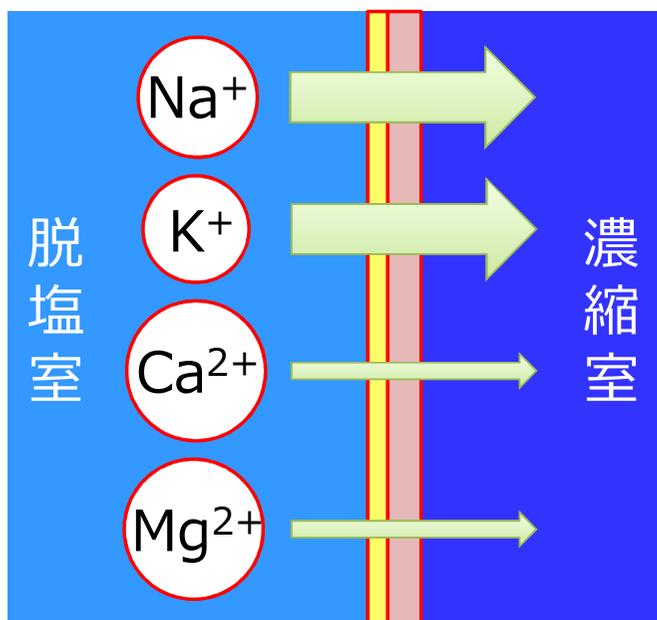
達成

Point 1
冷却晶析工程でカーナライトを析出させる



Point 2
カーナライトをMgCl₂とKClに分離する

1) 邑上泰平, 加留部智彦, Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 73, 125 (2019)
2) 特開2020-049471



製塩用陽イオン交換膜（製塩用膜）

2価陽イオン難透過性能があり、
1価陽イオンが透過しやすい

カーナライト ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) に水を添加すると溶解し、溶液中では、 K^+ , Mg^{2+} , Cl^- として溶存している



製塩用陽イオン交換膜を用いて電気透析を行うと、

K^+ : 膜を透過しやすいため、濃縮室へ移動する

Mg^{2+} : 膜を透過しにくいいため、脱塩室に残留する

⇒脱塩室で高純度 MgCl_2 水溶液が得られると考えた

苦汁処理
工程

MgCl₂, KCl分離

カーナ
ライト

溶解

水

MgCl₂, KCl分離用
電気透析

KCl水溶液

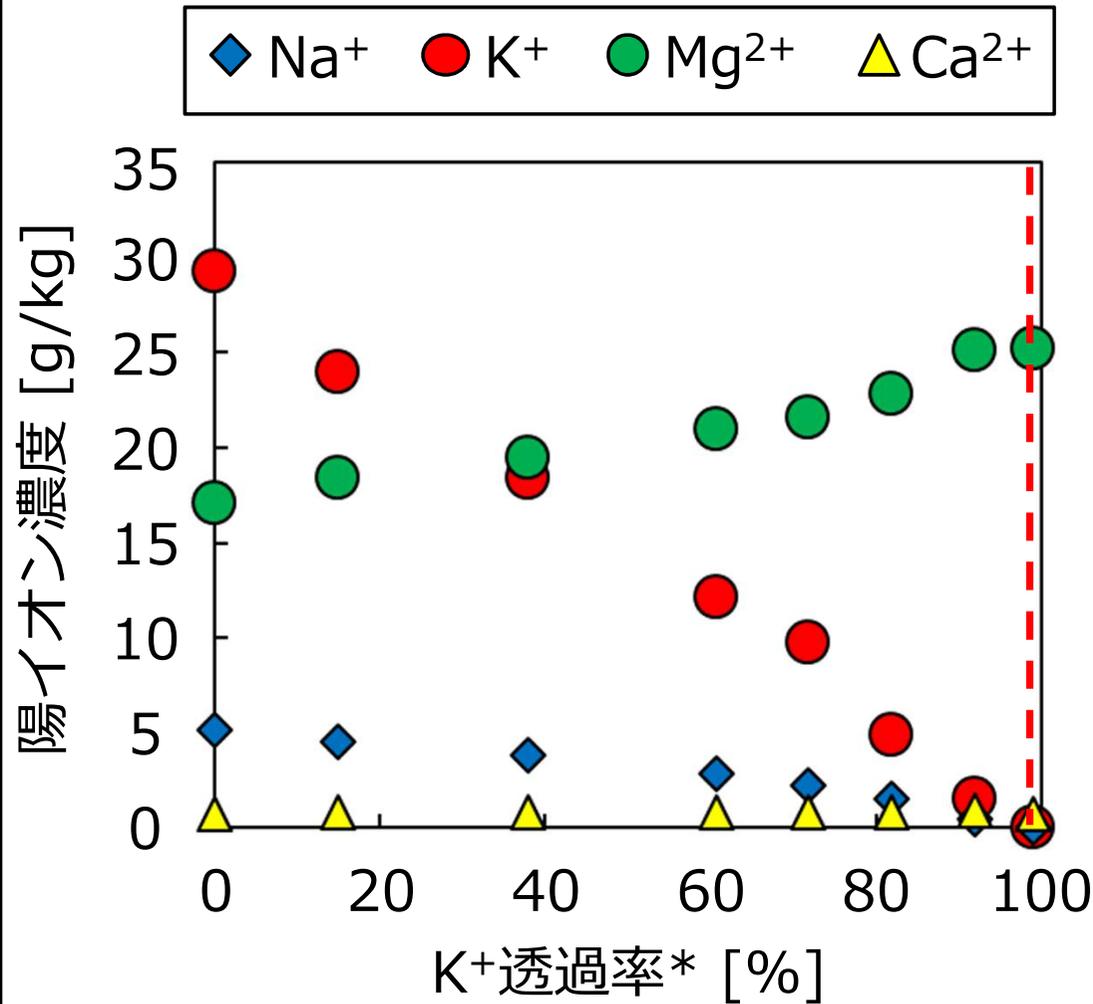
MgCl₂水溶液

冷却晶析試験で得たカーナライトの20%水溶液に相当する調製溶液を装置に供給して、電気透析試験を実施した

透析条件

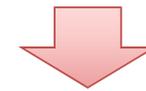
- ・ 電流密度 : 2 A/dm²
- ・ 透析温度 : 25℃
- ・ 有効膜面積 : 0.3 dm²/対
- ・ 膜対数 : 15対

脱塩室の各陽イオン濃度の変化



時間経過とともに

- ・ K⁺は濃縮室へ移動した
- ・ Mg²⁺は脱塩室に残留した



製塩用膜を用いた電気透析により、カーナライト水溶液をMgCl₂水溶液とKCl水溶液に分離できる

*K⁺透過率 [%]

$$= \frac{\text{脱塩室からのK}^+\text{減少量 [g]}}{\text{試験開始時の脱塩室のK}^+\text{量 [g]}} \times 100$$

[%]

Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	MgCl ₂ 純度*
0.07	2.5	<0.01	<0.01	7.5	0.002	0.03	97.5

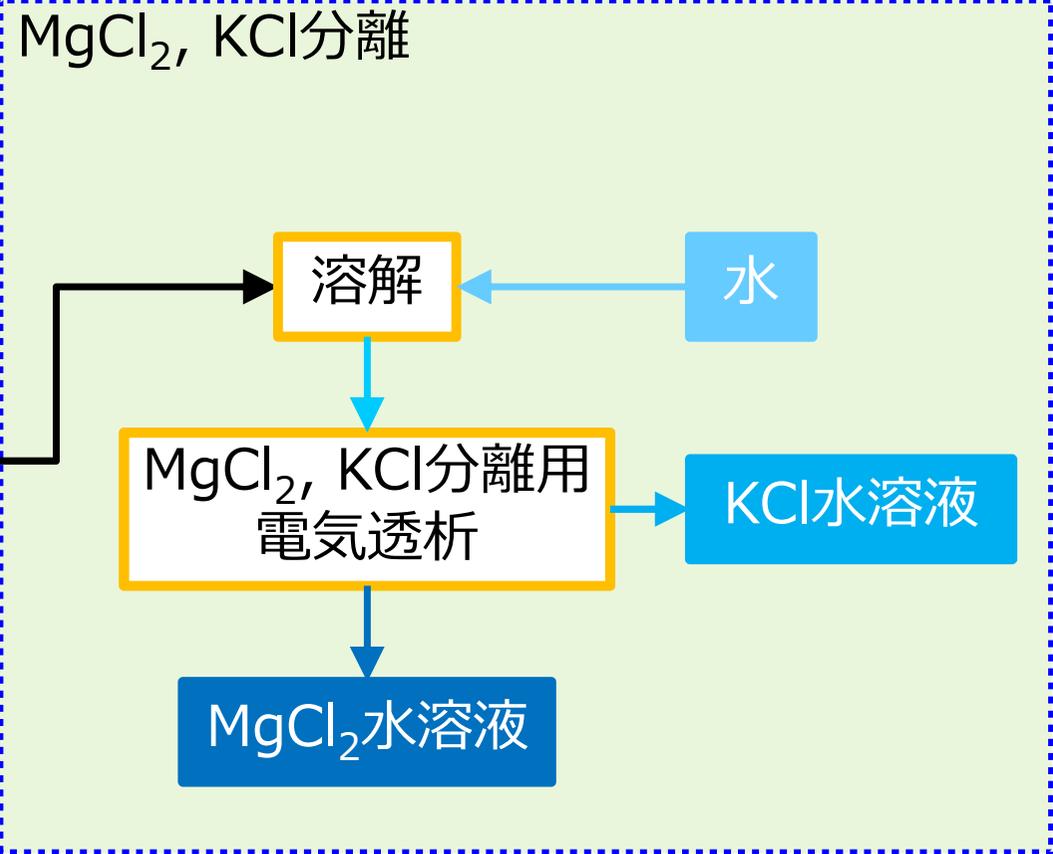
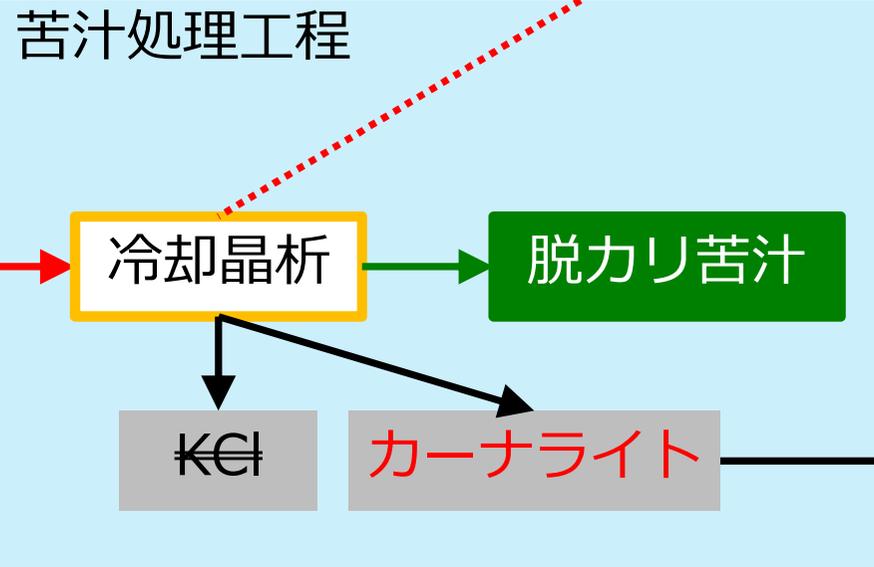
$$*MgCl_2\text{純度} [\%] = \frac{\text{溶液中の}MgCl_2\text{濃度} [g/kg]}{\text{溶液の全塩分濃度} [g/kg]} \times 100$$

カーナライト水溶液から純度97.5%の高純度MgCl₂水溶液を回収できる

Point 1
冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

達成

製塩
工程



Point 2
カーナライトをMgCl₂とKClに分離する

達成

1) 邑上泰平, 加留部智彦, *Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn.*, 73, 125 (2019)
2) 特開2020-049471

カーナライト晶析を利用し、苦汁から高純度塩化マグネシウム水溶液を回収する技術について紹介した

Point 1 : 冷却晶析工程でカーナライトを析出させる

- ・海水濃縮時に一般膜/製塩用膜の割合を増加させることで、苦汁の Mg^{2+}/K^{+} 濃度比を増加させることができ、冷却晶析工程でカーナライトを析出させることができる
- ・カーナライトを析出させることで、苦汁から Mg^{2+} , K^{+} , Cl^{-} を選択的に回収できる

Point 2 : カーナライトを $MgCl_2$ と KCl に分離する

- ・製塩用膜を用いた電気透析により、カーナライト水溶液を $MgCl_2$ 水溶液と KCl 水溶液に分離できる
- ・脱塩室から純度97.5%の高純度 $MgCl_2$ 水溶液を回収できる

ご清聴ありがとうございました

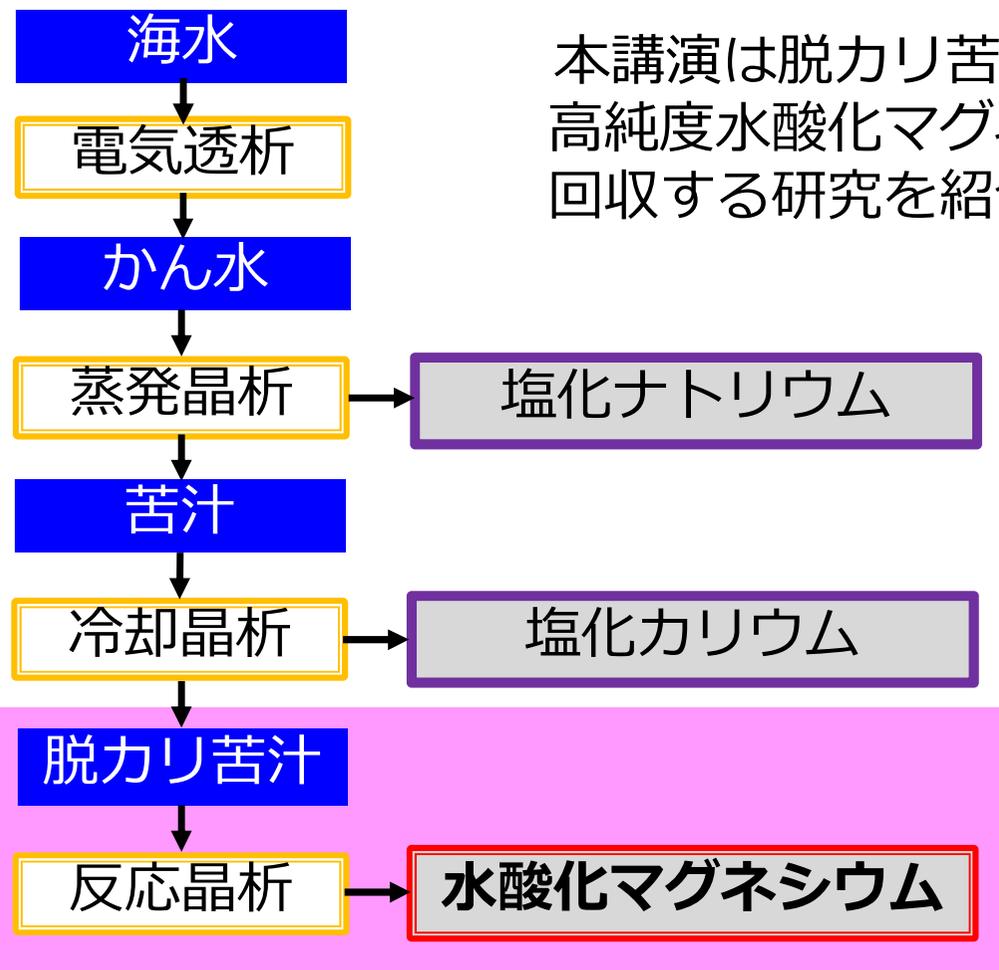
Salt & Seawater Science Seminar 2024

海水から未来を創る – 製塩工程溶液からのマグネシウム回収と利用 –

製塩苦汁から得られる水酸化マグネシウムの 高純度化に関する検討



公益財団法人塩事業センター 海水総合研究所
峯尾 隼人



本講演は脱カリ苦汁中のマグネシウム(以下、Mg)を高純度水酸化マグネシウム(以下、 $Mg(OH)_2$)として、回収する研究を紹介



研究背景

○脱カリ苦汁は多くのMgを含んでおり、現状、粗製海水塩化マグネシウムとして低価格で販売されている

○ $Mg(OH)_2$ の需要は増加傾向にある

○ $Mg(OH)_2$ は様々な用途に利用されている



工業

(排煙脱硫)
(排水処理)



難燃剤



医薬

(下剤)
(制酸剤)



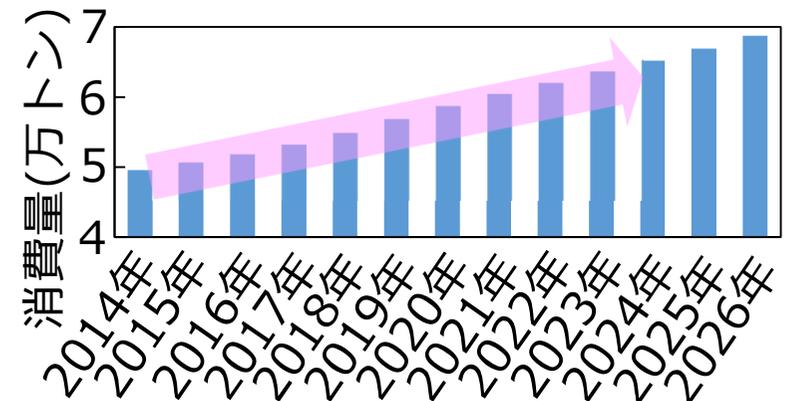
試薬



脱カリ苦汁中のMgを
 $Mg(OH)_2$ として回収し、
高価格で販売したい

脱カリ苦汁組成の一例 (g/100g)

Na	Mg	Ca	K	Cl	SO ₄
0.7	4.7	3.4	1.6	22.3	0.004



日本における $Mg(OH)_2$ 消費量の推移※

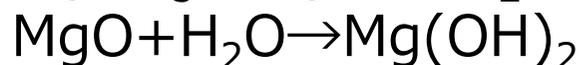
※ Future Market Insights社, "Magnesium Hydroxide Market - Global Industry Analysis and Opportunity Assessment, 2016-2026"

Mg(OH)₂の製造法

Mg(OH)₂の製造法は鉱石由来、海水由来の二つに大別される

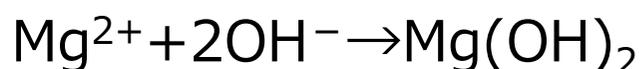
○鉱石由来

- ・ブルーサイト鉱石(主成分：Mg(OH)₂)を粉砕することで製造される
- ・マグネサイト鉱石(主成分：炭酸マグネシウム)を焼成後に水和させることで製造される



○海水由来(国内産の製品の大半が該当する)

- ・海水、苦汁にアルカリ剤※を添加することで製造される



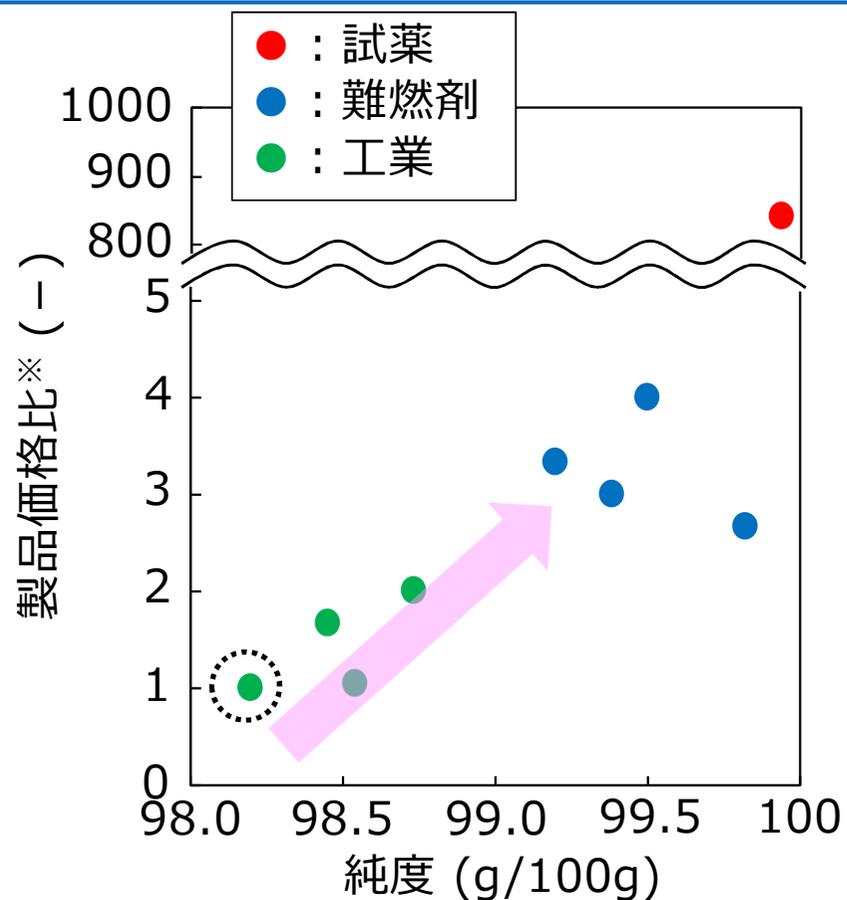
※NaOH水溶液、Ca(OH)₂など

☆苦汁由来の製造法はアルカリ剤が必要なため、製造コストがかかる



付加価値の高いMg(OH)₂を製造し、より高価格で販売する必要がある

Mg(OH)₂純度と価格



純度と製品価格比の関係

○Mg(OH)₂は用途によって純度や価格が異なる
 ○価格は純度が高いほど高い傾向を示す



**脱カリ苦汁から高純度Mg(OH)₂
 を製造する方法について検討した**

※最も安価であった製品の価格(○)と該当製品の価格の比より算出した

脱カリ苦汁から得られる $Mg(OH)_2$ 組成と高純度化脱カリ苦汁にNaOH水溶液を添加して得られた $Mg(OH)_2$ の組成例 ※

(g/100g)

B	Ca	Cl	SO ₄	純度※※
0.05	0.02	0.20	0.02	99.7

※Na, K, Br, Cu, Zn, Sr, Mn, Fe, Ni は0.01g/100g以下

※※差し引き法

○主要不純物(0.01g/100g以上)はB, Ca, Cl, SO₄であった

本講演では主要不純物のうちB, Caの低減について
検討した内容を紹介します

実験方法：晶析

- 1:晶析槽
 2:攪拌機
 3:攪拌翼
 4:温度計
 5:温度コントローラー
 6:マントルヒーター
 or 恒温水槽
 7:自動滴定装置
 8: NaOH水溶液
 9: 篩 (目開き1mm)
 10: Ca(OH)₂粉末

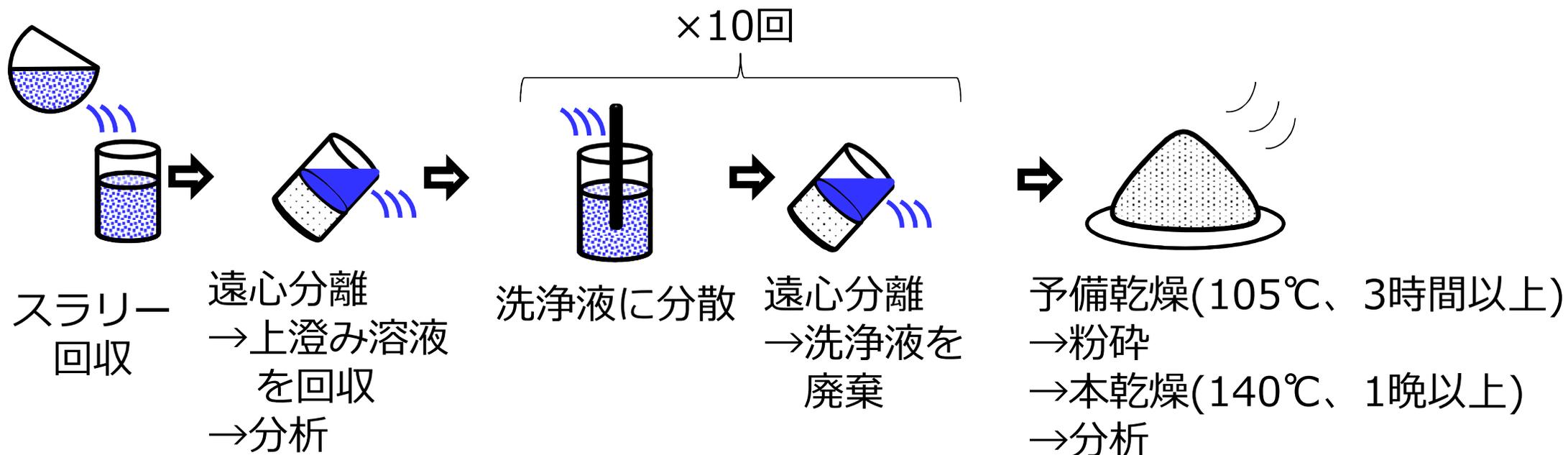
図 実験装置図

原料溶液：脱カリ苦汁※
 晶析槽：丸底セパラブルフラスコ(1-8L)
 アルカリ剤：4-48%NaOH水溶液
 Ca(OH)₂粉末
 反応率※※：0.02-0.96
 晶析温度：10-60℃
 晶析時間：30分(4-48%NaOH水溶液)
 90分(Ca(OH)₂粉末)
 攪拌速度：300rpm

※脱カリ苦汁組成

Mg	Ca	K	Na	Cl	Br	SO ₄	B
						(g/100g)	
						(ppm)	
4.72	3.42	1.56	0.72	22.3	1.33	40.8	82.5

※※脱カリ苦汁中のMgのうち、Mg(OH)₂として析出した割合



分析

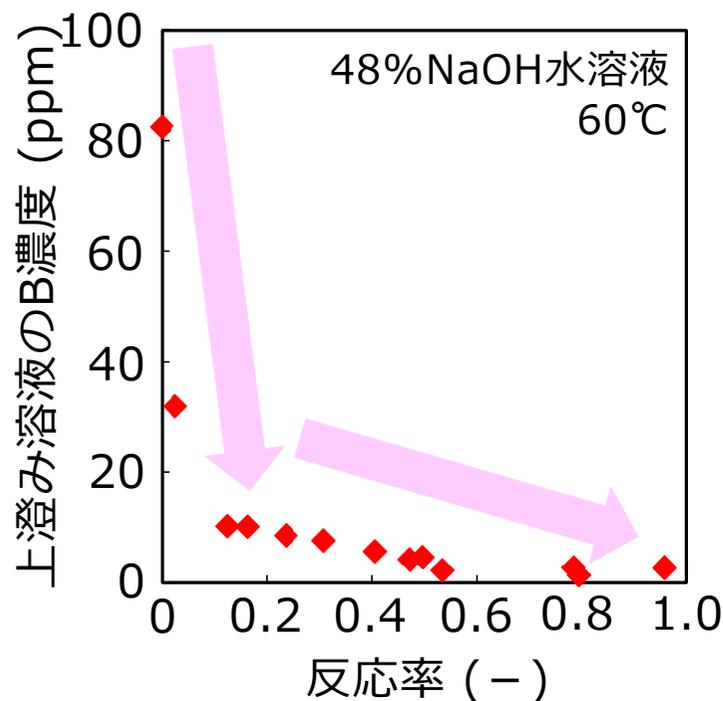
上澄み溶液： ICP ; Mg, B

析出物： ICP (酸で溶解) ; Ca, B, Na, K
IC (酸で溶解) ; SO₄

TG-MS ; CO₃ (CaCO₃分解温度付近(825°C)のCO₂発生量)

- B含有量の低減に関する検討
- Ca含有量の低減に関する検討

Mg(OH)₂反応晶析過程における脱カリ苦汁中のB濃度の推移



反応率と上澄み溶液のB濃度との関係

○上澄み溶液のB濃度は反応率0~0.15において著しく減少した

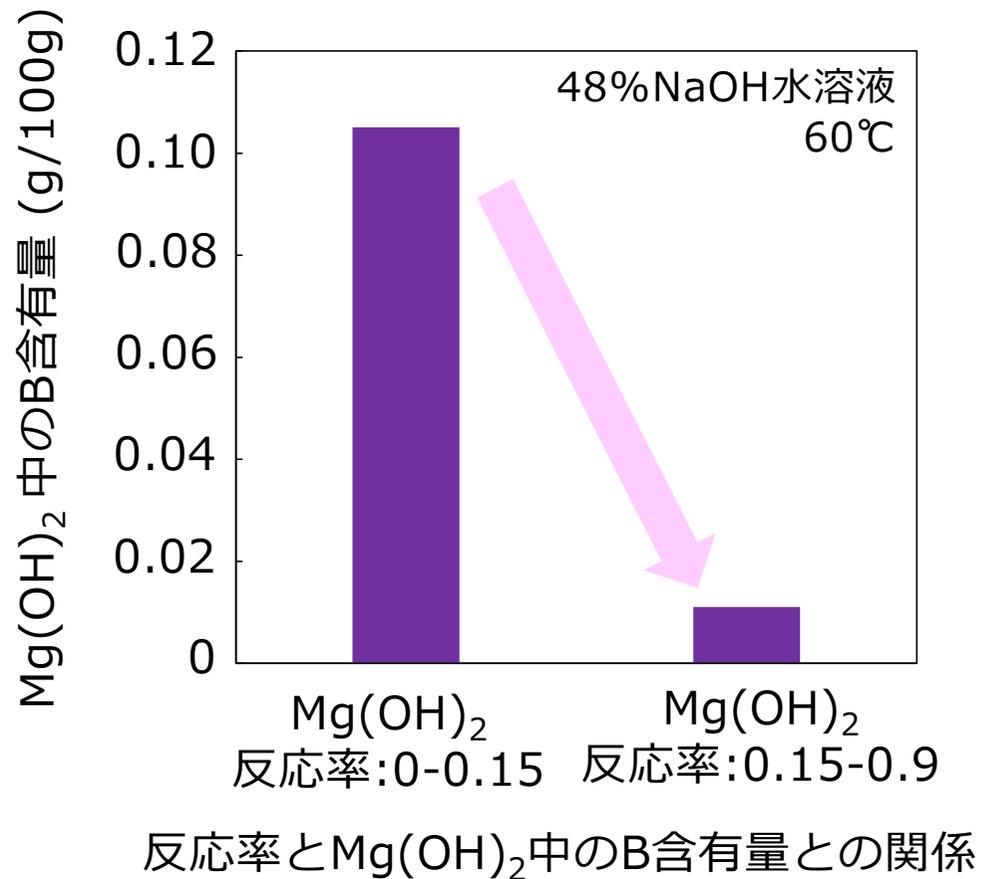
○BはMg(OH)₂と吸着共沈することが知られている※



反応率0.15までに析出するMg(OH)₂はB含有量が多くなることが予想される

※A. Izawa, M. Motoki, C. Tokoro, K. Sasaki, "Sorption Mechanism of Boron to Magnesium Hydroxide using Co-precipitation Process in Aqueous Solution", The Mining and Materials Processing Institute of Japan, 130, 155-161 (2014)

反応率とMg(OH)₂中のB含有量との関係



反応率0.15以降に析出した
Mg(OH)₂のB含有量は、

- ・ 0.01g/100gであった
- ・ 0.15までに析出したMg(OH)₂よりも著しく低い



**反応率0.15までに析出する
Mg(OH)₂を除去することで、
B含有量を低減することができる**

○ B含有量の低減方法

○ Ca含有量の低減方法

添加するアルカリ剤の種類がCa含有量に与える影響

脱カリ苦汁から回収した $Mg(OH)_2$ の組成(晶析条件：60℃)
(g/100g)

アルカリ剤	反応率	Ca	Cl	B	SO ₄	純度
48%NaOH水溶液	0.80	0.11	0.15	0.04	0.02	99.7
Ca(OH) ₂ 粉末	0.89	1.14	0.12	0.02	0.02	98.7

- Ca含有量はアルカリ剤の種類により異なり、
Ca(OH)₂粉末よりもNaOH水溶液を用いた方が低くなる

⇒アルカリ剤によって、Caの混入形態が異なる

アルカリ剤ごとにCa低減方法を検討した

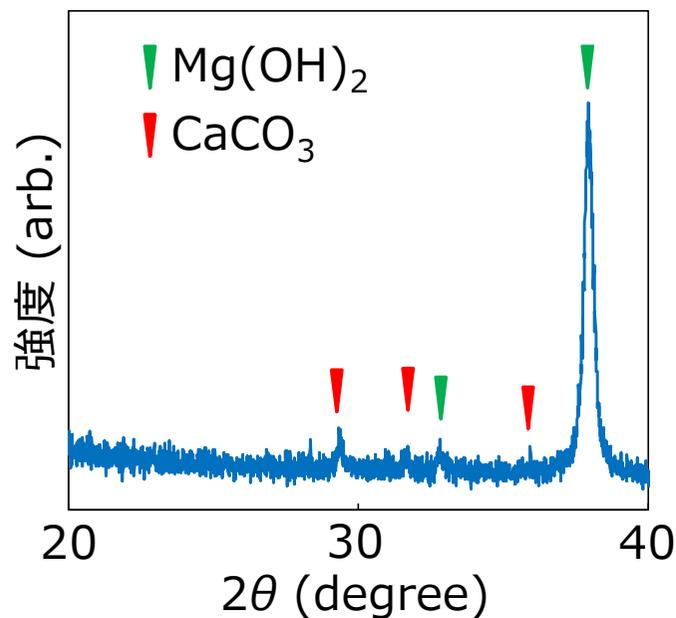
○ B含有量の低減方法

○ Ca含有量の低減方法

Ca(OH)₂粉末を添加する場合

NaOH水溶液を添加する場合

Ca(OH)₂粉末の添加により得たMg(OH)₂のX線回折パターン



○Mg(OH)₂以外にCaCO₃を検出した
⇒CaはCaCO₃として混入した

○Ca(OH)₂粉末は大気中のCO₂と反応し、
容易にCaCO₃に変化する※

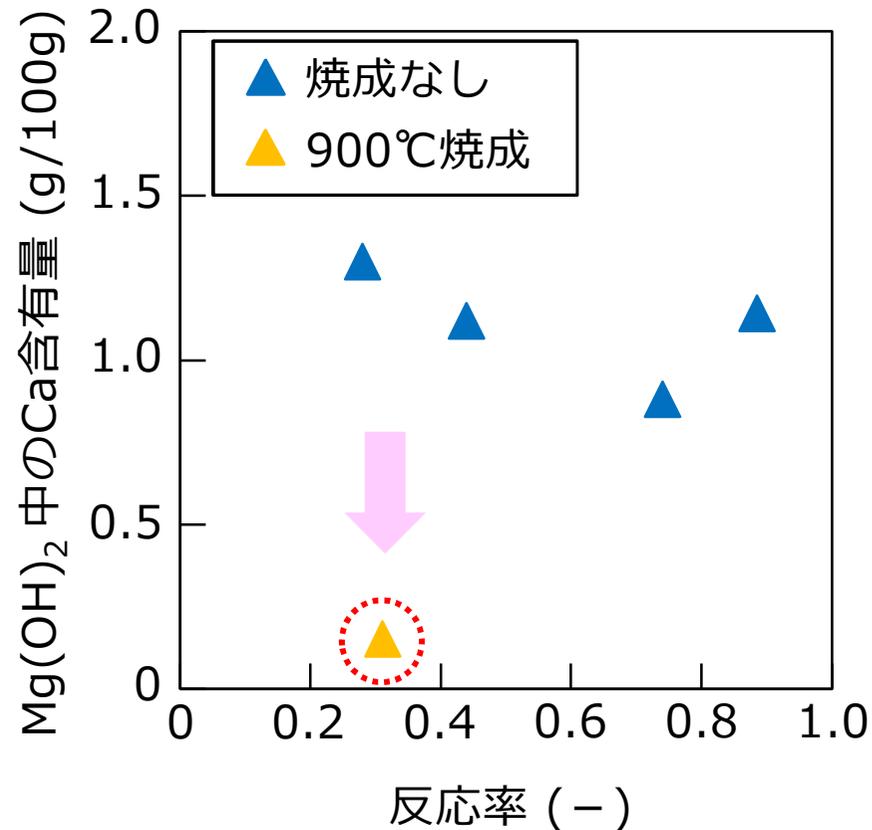


**Ca(OH)₂粉末に含まれるCaCO₃が
混入することでMg(OH)₂のCa含有量が
増加すると推測した**

図 XRD測定結果
(晶析条件：60℃、反応率：0.8)

※H.nanjo (Eds), "Encyclopaedia chimica", KYORITSU SHUPPAN CO., LTD., Tokyo , 5, 22-23 (1961)

添加するCa(OH)₂の焼成によるMg(OH)₂中のCa含有量の低減効果



反応率とCa含有量との関係
(晶析条件：60℃)

Ca(OH)₂粉末を900℃で3時間焼成してから
脱カリ苦汁に添加した
(Ca(OH)₂とCaCO₃はCaOに変化する)



○Ca含有量は0.15g/100gに減少した(▲→▲)



**脱カリ苦汁に添加するCa(OH)₂粉末を
事前に焼成することでMg(OH)₂中の
Ca含有量を低減することができる**

○ B含有量の低減方法

○ Ca含有量の低減方法

Ca(OH)₂粉末を添加する場合

NaOH水溶液を添加する場合

NaOH水溶液の添加により得た $\text{Mg}(\text{OH})_2$ へのCa混入形態の推測

NaOH水溶液を添加して得た $\text{Mg}(\text{OH})_2$ はCa含有量が少ないため、XRDでCa塩が検出されなかった
→以下の4つのCa混入形態を仮定し、それぞれの妥当性を検証した

① Ca^{2+}

付着母液や液泡に溶存する

② CaSO_4

脱カリ苦汁中の SO_4^{2-} と結合して析出する

③ CaCO_3

CO_2 の溶解に由来する CO_3^{2-} と結合して析出する

④ $\text{Ca}(\text{OH})_2$

NaOH由来の OH^- と結合して析出する

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ の組成(mmol/100g)

Ca	K	SO_4	CO_3
2.8	<0.1	0.2	0.3

晶析条件：60℃、反応率：0.8

脱カリ苦汁中のCaおよびK濃度
(mmol/100g)

Ca	K
85.3	39.9

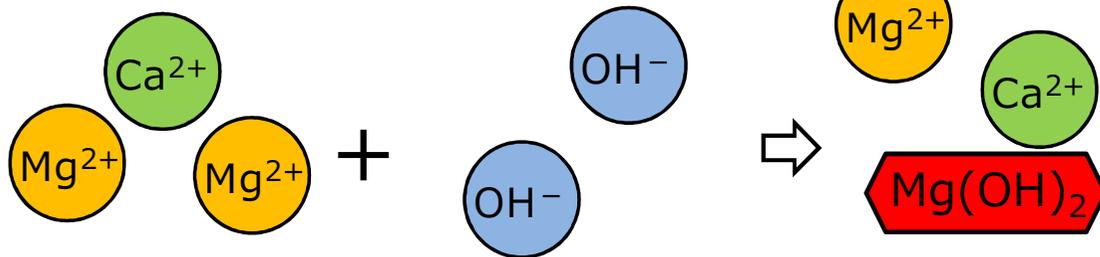
- Ca/K含有量比(131.6)は脱カリ苦汁のCa/K濃度比(2.1)より著しく高い
→① Ca^{2+} (付着母液、液泡) は些少である
- SO_4 含有量はCa含有量よりも著しく低い
→② CaSO_4 はCa混入の主要因ではない
- CO_3 含有量はCa含有量よりも著しく低い
→③ CaCO_3 はCa混入の主要因ではない



**$\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中のCaは主に
④ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ として混入していると
推測した**

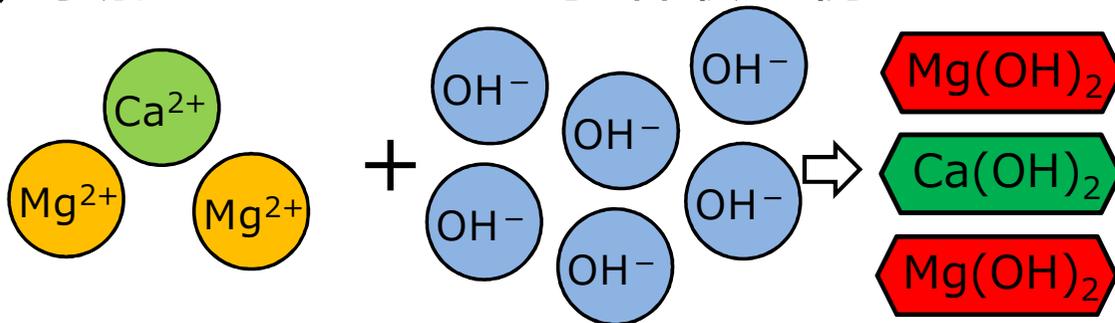
NaOH水溶液の添加に伴う水酸化物塩の析出挙動（イメージ）

◇ 晶析装置全体



OHイオン供給律速
 →溶解度積が低い $Mg(OH)_2$ が
 選択的に析出する

◇ 添加されたNaOH水溶液近傍

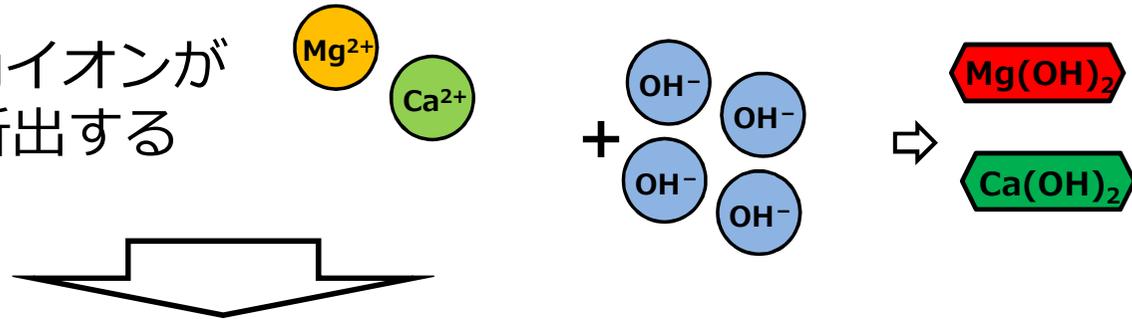


陽イオン供給律速
 →OHイオン濃度が高く、
 Mgイオンが不足するため
 $Ca(OH)_2$ が析出する

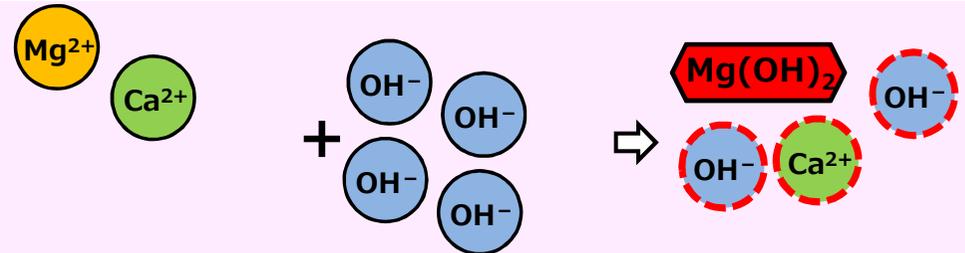
添加されたNaOH水溶液近傍において $Ca(OH)_2$ が析出して
 $Mg(OH)_2$ に混入すると推測した

NaOH水溶液近傍におけるCa(OH)₂析出抑制方法(イメージ)

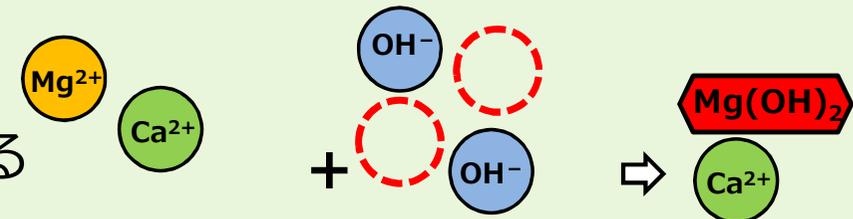
OHイオン濃度が高く、Mgイオンが不足するためCa(OH)₂が析出する



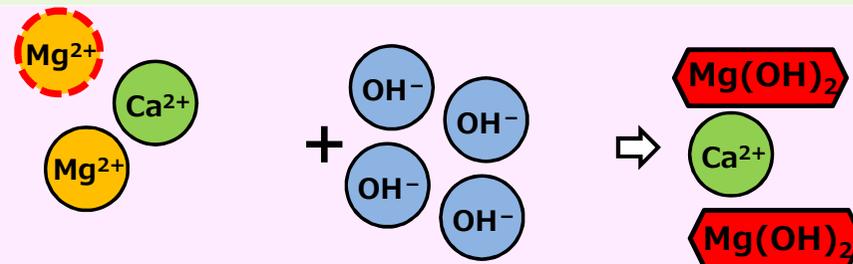
◇晶析温度を低くする
⇒Ca(OH)₂の溶解度を高める



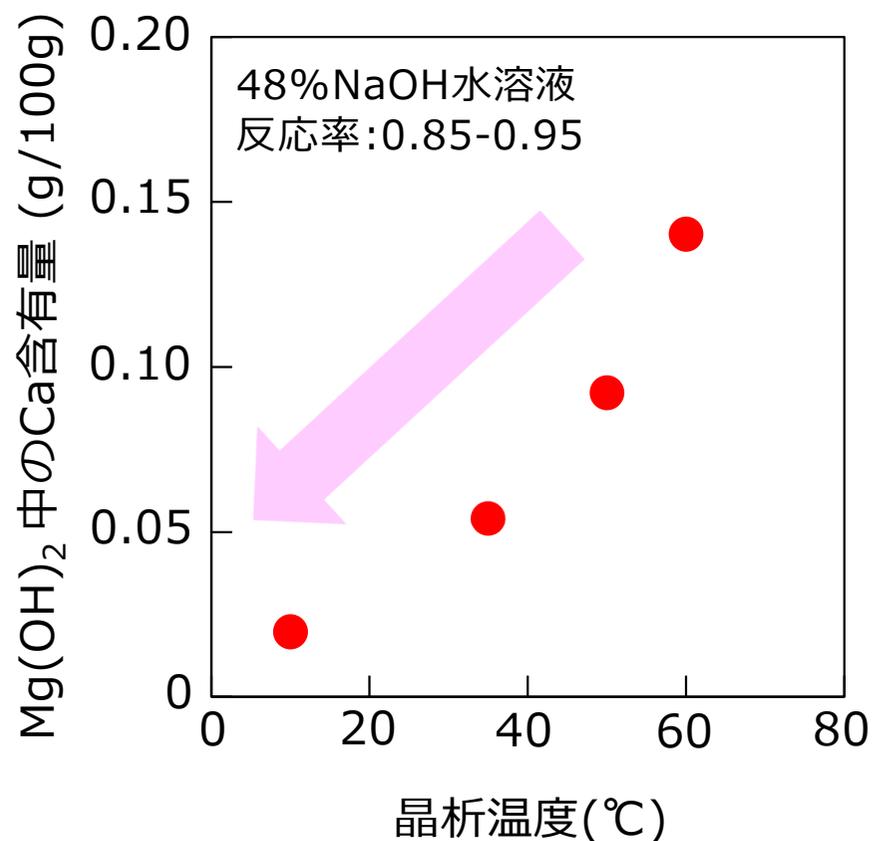
◇NaOH水溶液の濃度を減少させる
⇒局所的なOHイオン濃度を減少させる



◇反応率を低くする
⇒溶液中のMgイオン濃度を減少させすぎない



晶析温度が $Mg(OH)_2$ のCa含有量に与える影響



- 温度が低いほどCa含有量は少ない
- 温度が低いほど $Ca(OH)_2$ の溶解度は高い※

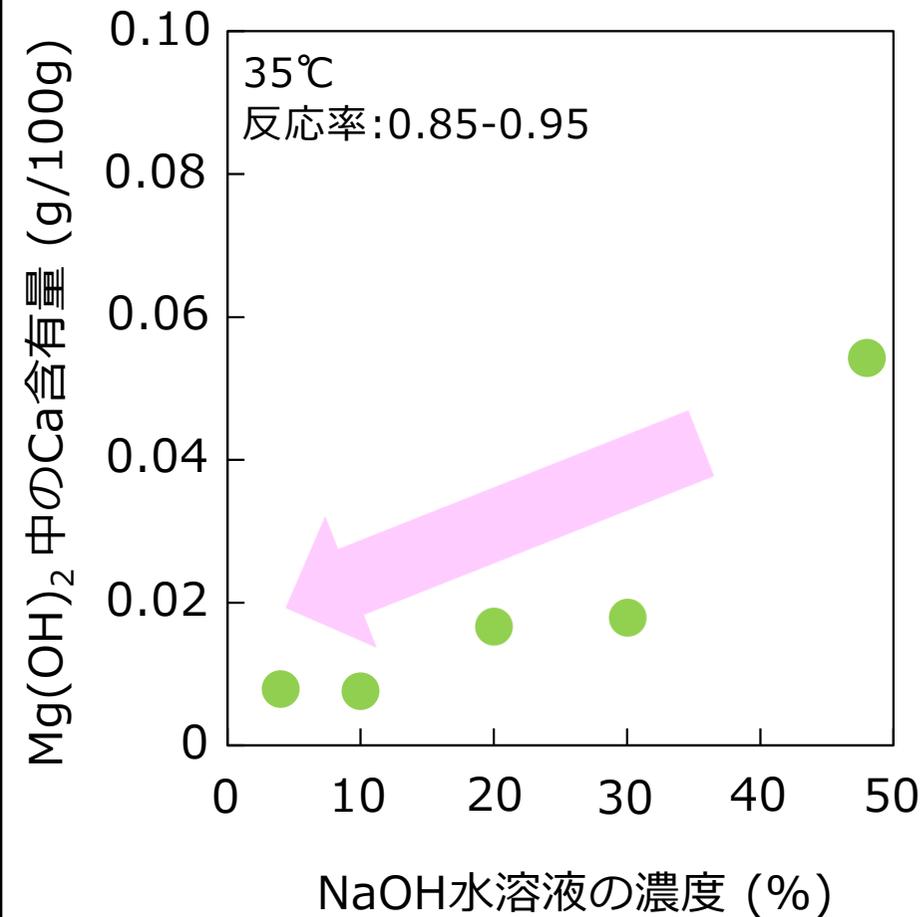


**晶析温度を低くすることで
 $Mg(OH)_2$ 中のCa含有量を
低減することができる**

晶析温度と $Mg(OH)_2$ 中のCa含有量との関係

※The Chemical Society of Japan, “化学便覧 基礎編 改訂4版”,
MARUZEN-YUSHODO Company, Limited, Tokyo, 2, 162 (1993)

NaOH水溶液の濃度がMg(OH)₂のCa含有量に与える影響



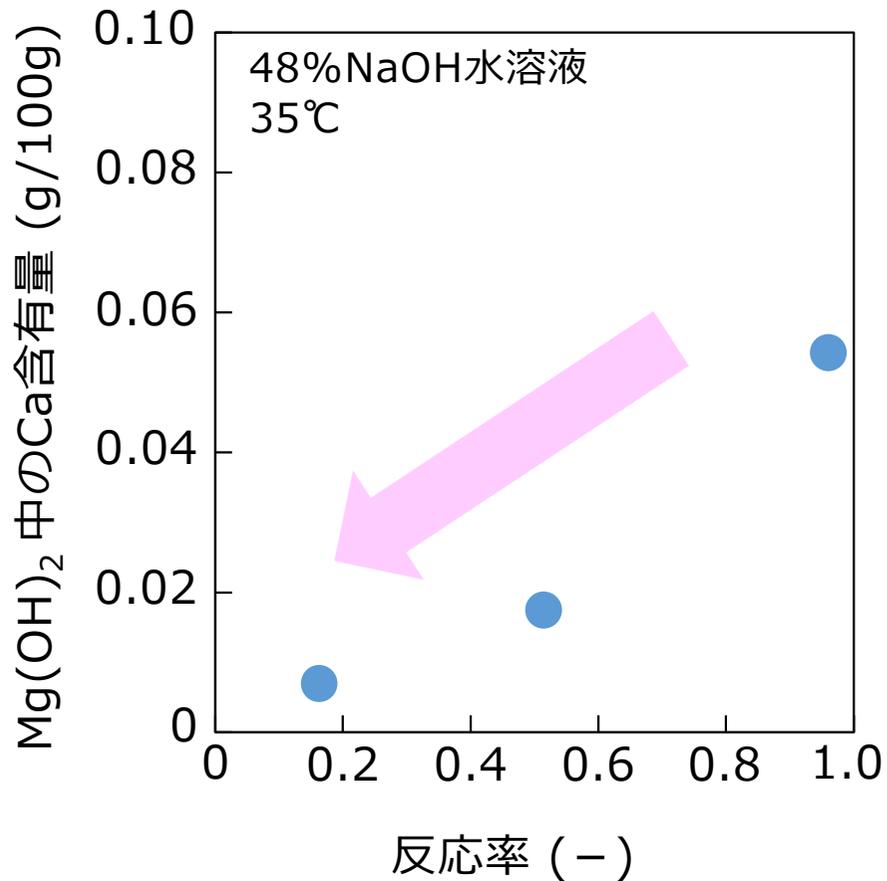
NaOH水溶液の濃度と
Mg(OH)₂ 中のCa含有量との関係

- NaOH水溶液の濃度が低いほどCa含有量は少ない
- NaOH水溶液の濃度が低いほど添加されたNaOH水溶液近傍のOHイオン濃度は低くなる



**NaOH水溶液の濃度を低くすることで
Mg(OH)₂中のCa含有量を
低減することができる**

反応率が $\text{Mg}(\text{OH})_2$ のCa含有量に与える影響



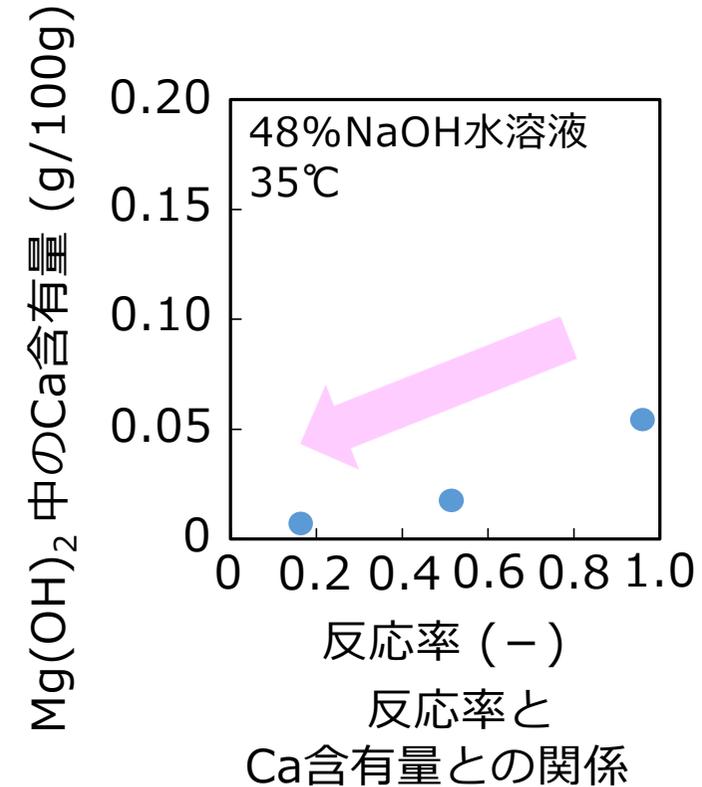
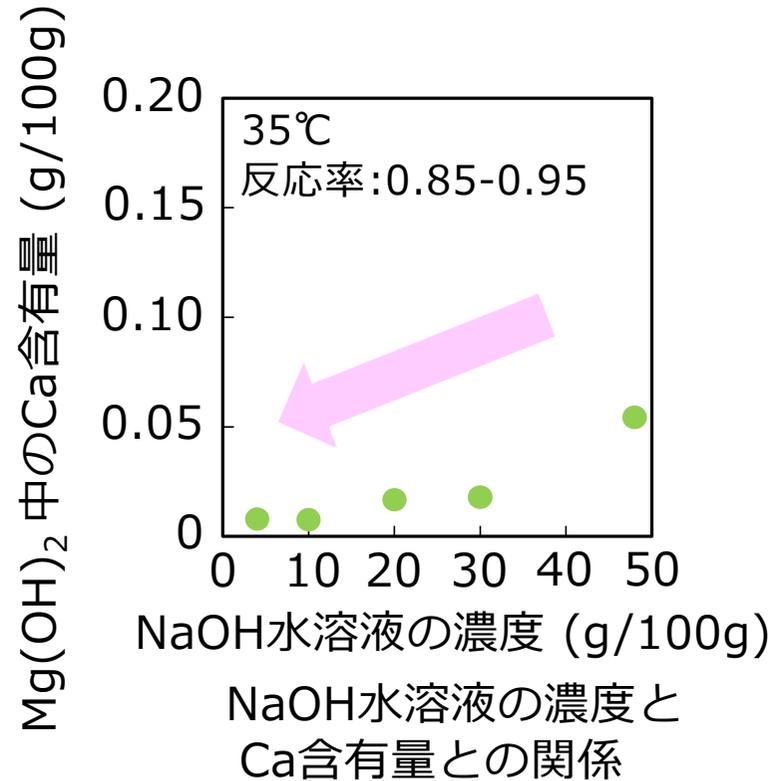
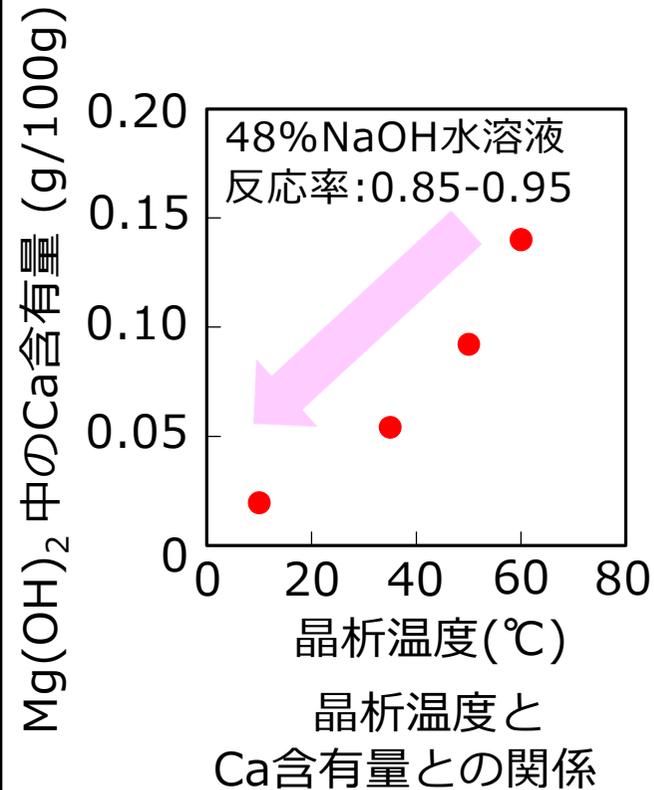
- 反応率が低いほどCa含有量は少ない
- 反応率が低いほど溶液中のMg濃度は高い



**反応率を低くすることで
 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中のCa含有量を
低減することができる**

反応率と $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中のCa含有量との関係

各操作におけるCa含有量低減効果の比較



低温で晶析することがCa含有量の低減にもっとも効果的であった

脱カリ苦汁から得られる $\text{Mg}(\text{OH})_2$ のB, Ca含有量の低減に関する研究の一部を紹介した

○B含有量低減方法

- ・ 0.15までに析出した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を除去する

○Ca含有量低減方法

◇ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末を添加する場合

- ・ 脱カリ苦汁への添加前に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末を焼成する

◇ NaOH水溶液を添加する場合

- ・ 晶析温度、NaOH水溶液の濃度、反応率を低くする
⇒低温で晶析することがもっとも効果的である

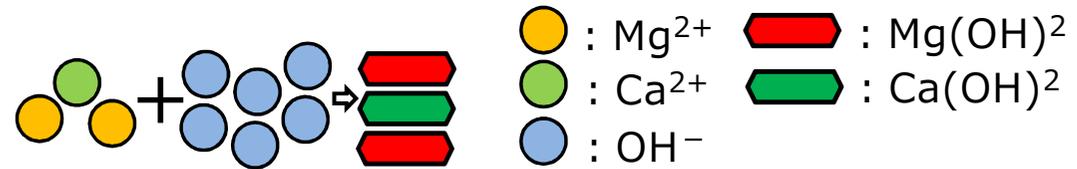
本講演で報告したB, Caの他、既にCl, SO₄の低減方法についても検討を終えており、ラボスケールでは脱カリ苦汁から純度99.99%のMg(OH)₂を製造可能
 ⇒今後、論文、学会などで発表予定

高純度Mg(OH)₂の組成 (g/100g)

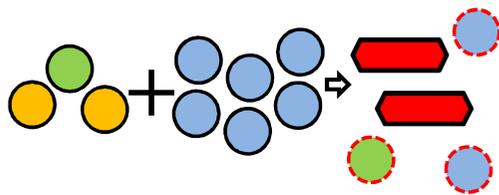
Na	K	Ca	Cl	SO ₄	純度
<0.001	<0.001	0.001	0.005	0.009	99.99

ご清聴いただき、ありがとうございました

晶析条件の操作によるCa低減方法(イメージ)

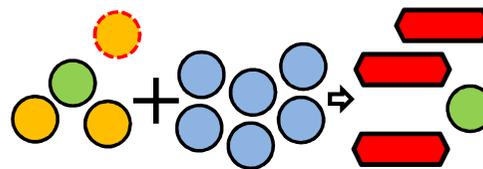


晶析温度を
低くする



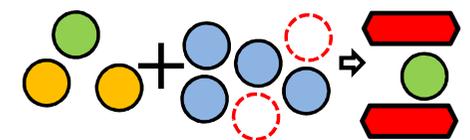
$Ca(OH)_2$ 溶解度が
増加する

反応率を
低くする



溶液中のMg
濃度が増加する

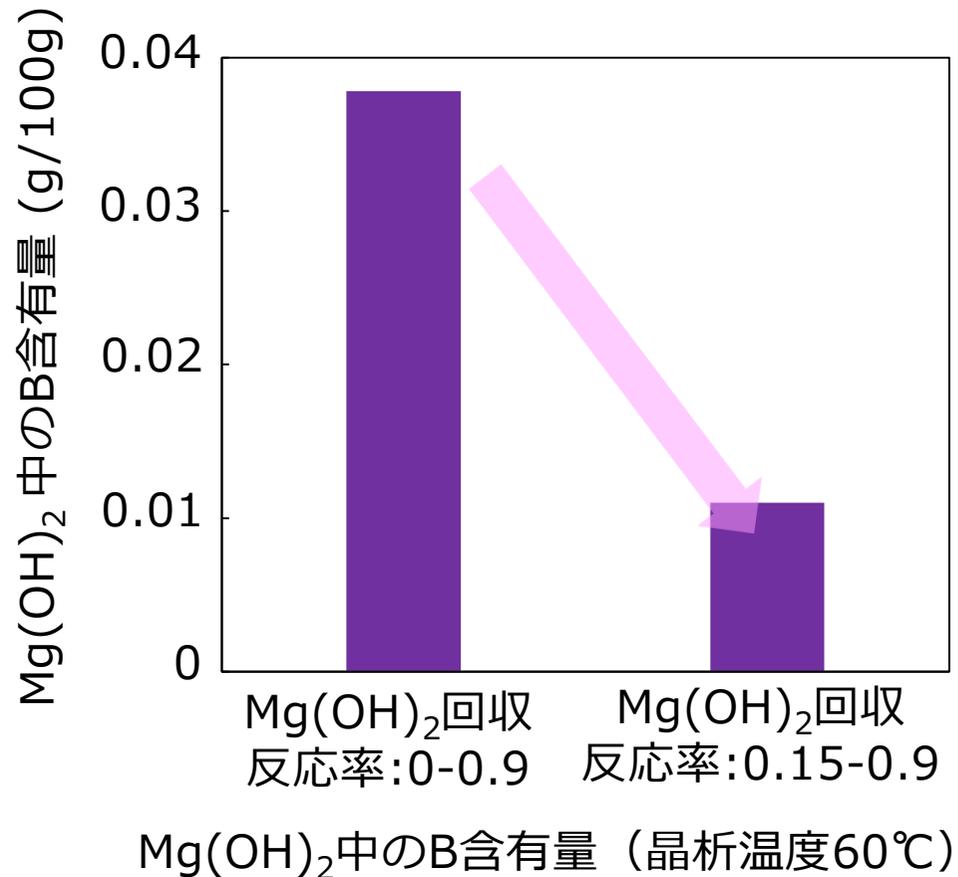
NaOH水溶液の
濃度を低くする



局所的なOHイオン
濃度が減少する

$Ca(OH)_2$ 析出量が低減する

上澄み溶液を原料に用いた場合のB含有量



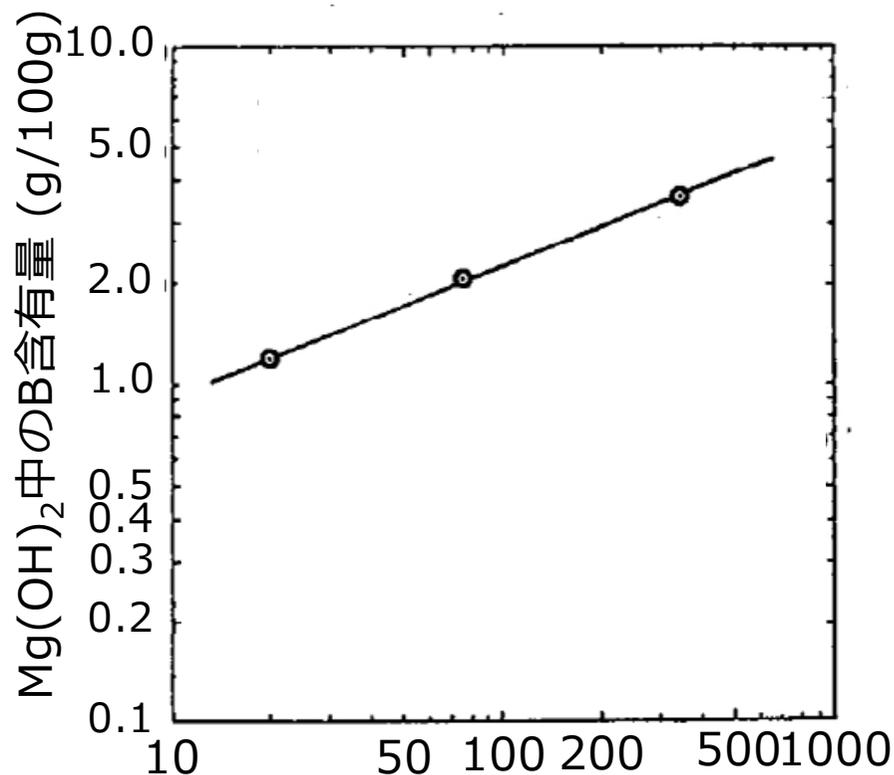
反応率0.15以降に析出した
Mg(OH)₂のB含有量は、

- ・ 0.01g/100gであった
- ・ 0.15までに析出したMg(OH)₂よりも著しく低い



**反応率0.15までに析出する
Mg(OH)₂を除去することで、
B含有量を低減することができる**

Mg(OH)₂へのB混入メカニズム



上澄み溶液のB濃度 (ppm)
 晶析後の上澄み溶液のB濃度と
 Mg(OH)₂中のB含有量との関係※

Bを含む塩化マグネシウム溶液に
 NaOH水溶液を添加して得られた
 Mg(OH)₂中のB含有量は、
 Freudrichの吸着等温式に従う

$$\log W = \log K_F + (1/n) \log C$$

W:吸着量
 C:溶液の平衡濃度
 K_F、(1/n):吸着定数

⇒BはMg(OH)₂に吸着して混入する※



脱カリ苦汁からの回収においても
 同様のメカニズムであると推測している

※ M. Ayai, Y. Ikeda, "Absorption of Boron into Magnesium Hydroxide", Bulletin of the Society of Salt Science, Japan, 15, 17-22 (1961)

製塩工程溶液等を原料とする マグネシウム金属製造技術に関する基礎研究

関西大学 化学生命工学部

竹中 俊英

・本日の小原様のご講演 と重複があることを予めお詫びします

謝辞

本発表でのMg製造プロセスに関連する研究成果の多くは、
2021~2023年度 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合
開発機構(NEDO) 先導研究プログラム：

「濃縮海水を原料とするMgのグリーン新製錬技術開発」
により得られたものです。

当該プロジェクトは、以下のメンバーによる共同研究です

小原 久	(日本マグネシウム協会)
星野 岳穂	(東京大学)
千野 靖正	(産業技術総合研究所)
松本 敏治	(戸畑製作所)
井上 誠	(富山高等専門学校)
竹中 俊英	(関西大学)

本発表では共同研究者の皆様の成果も用いさせていただきます。

本日の構成

1. Mg金属製造プロセスについて
 - 金属製錬法の一般論
 - Mg製錬法
2. 日本国内でのMg金属の製造を目指して
 - 先導研究プログラムのアウトライン
 - 先導研究プログラムでの成果
 - 今後の研究展開

一次地金製造プロセス

	主な鉱石とその成分			主な製造法
	鉱石名	化学式	付随成分	
鉄	鉄鉱石	Fe_2O_3	+ 脈石	高炉 + 転炉
アルミニウム	ボーキサイト	$Al_2O_3 + Fe-Si-O$	+ 脈石	Bayer法 + Héroult法
銅	黄銅鉱	$CuFeS_2$	+ 脈石	酸化製錬 + 電解精製
シリコン	珪砂	SiO_2	+ 脈石	炭素還元 (高温)
チタン	イルメナイト	$FeTiO_3$	+ 脈石	Kroll法
マグネシウム	ドロマイト	$CaMg(CO_3)_2$	+ 脈石	熱還元 (Pidgeon法)
	鹹水	$MgCl_2 + NaCl$	+ 水	溶融塩電解法

利用可能な技術を用い、

高品質なものを、より効率的に作るプロセスが生き残った

社会情勢(時代)に適合することも必要

現在では環境対応は必須、

安定した金属のサプライチェーンの維持も重要

⇒ **製造プロセスの転換点?**

地金価格 2020年頃までのざっくりした値

Fe	20億t	\$1 /kg (巾大)	¥3~8 /mol
Al	7000万t	\$2 /kg	¥6~7 /mol
Mg	100万t	\$2.5 /kg	¥7 /mol
Zn	2000万t	\$2.5 /kg	¥15~20 /mol
Ti	20万t	\$10 /kg	¥50 /mol
Si メタシリ	150万t (フェロシリ除く)	\$1~2 /kg	¥2~5 /mol

製錬 = 化学 と考えれば
 輸送等はkg単位ですが

CuやNiはこの数倍

Tiはやはり高価

安価な金属 ... 資源 & 効率的な製造法 + **安価&安定した「製錬」原料**

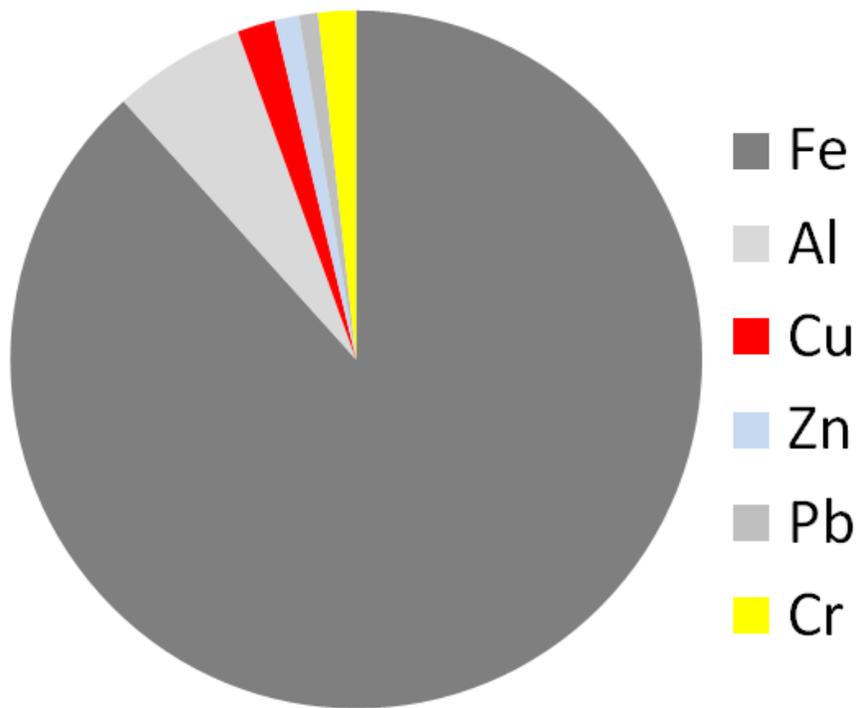
鉄鋼： 大量生産, **炭素還元**可能, **高品位の鉄鉱石** の存在

アルミニウム： 大量生産, **Bayer法**による高純度Al₂O₃製造

シリコン： 良質の**珪砂**をそのまま利用可, **炭素還元**可能

マグネシウム： **ドロマイト**をそのまま利用可, **コークス**燃焼熱

生産量の大きな金属の比較



鉄が圧倒的，アルミが続く

あくまでも，

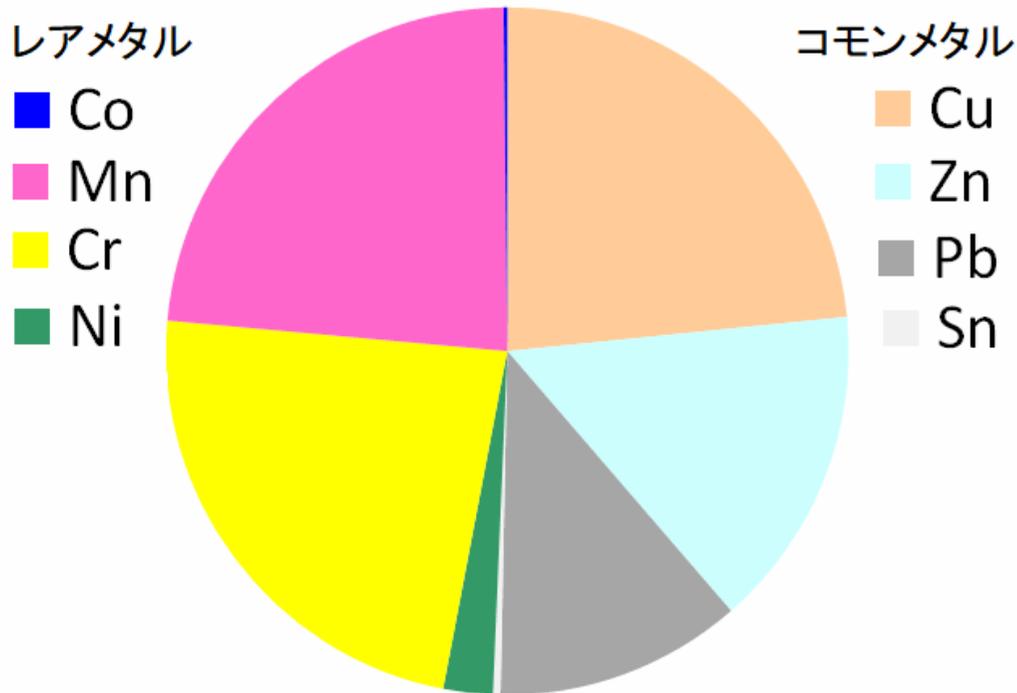
いくつかの**元素をピックアップ**した比較 → 金属全体に対する比率ではない

生産量：Mg ~100万t/y
Mg材料 ~ 30万t/y

⇔ Ni ~300万t/y
Sn ~40万t/y, Co ~20万t/y

代表的コモンメタルとレアメタルの比較

～鉄，アルミを除く～



コモンメタル，レアメタル
いずれも元素によって差が大きい

Mg材料

飛躍的に進展し「**構造材料として使える材料**」に！
Mgポテンシャルは非常に大きい

鉄(鋼)	19億ton/年
アルミニウム	7000万ton/年
チタン	20万ton/年
マグネシウム	100万ton/年

Mg材料としての需要は, Al の 1/100 以下に過ぎない

材料供給に関する課題が十分に解消されていない・・・特に**日本**



CO₂発生量を抑え, 国産を可能とするMg製錬技術の開発が不可欠

金属Mgの製造

～MgO, MgCl₂ の還元～

・化学還元法 ～還元剤を用いた還元～

- ~~還元剤: H₂, C/CO 1st choice~~
- 活性金属 (Al等) 3rd choice
(還元剤の製造が必要)

・電解還元法

- ~~水溶液電解 2nd choice~~
- 熔融塩電解 3rd choice

化学反応としてみた場合, 化学還元法と電解還元法の優劣はない

↓
できるかどうか
容易かどうか
で選択

Mg金属製造技術

	Si熱還元法	熔融塩電解法
原料	ドロマイト: $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	鹼水: MgCl_2
基本 反応	$\text{MgCa}(\text{CO}_3) \rightarrow \text{MgO} + \text{CaO} + 2\text{CO}_2$  $\text{MgO} + \text{CaO} + \frac{1}{2}\text{Si} \rightarrow \text{Mg}\uparrow + \frac{1}{2}\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  $\text{MgCl}_2 (+\text{電気}) \rightarrow \text{Mg} + \text{Cl}_2$
生産 割合	> 80%	残り
課題	CO_2 排出量, エネルギー消費 中国依存	原料(無水 MgCl_2)確保 電力確保

表 マグネシウム地金製造の消費エネルギーとCO₂排出量(kgあたり).

	電解法(IG)		Si還元法(ピジョン法)	
	エネルギー	CO ₂	エネルギー	CO ₂
実操業値*	132 MJ	17 kg	220 MJ	30 kg

エネルギー消費, CO₂排出量の観点からは 電解法 が優位

電解法, Si還元法とも改善の余地は大きい

日本国内でのMg金属地金の製造

- ・可能な限り国産資源を用いること
- ・低環境負荷(省エネ・低CO₂排出)であること
- ・現実性を有すること(実現可能性, 工業的意義)



熔融塩電解法による製造 …… 廃海水の利用 ← **先導研究**

熱還元法による製造 …… ドロマイトを原料としない
MgOベース原料

両者の位置づけ(竹中の中での)は後述

Mg を作るために海水をくみ上げる？

苦汁 食塩製造時などの **廃棄物**

汲み上げずみ, 濾過ずみ, 濃縮ずみ **大きな工学的付加価値**

国産資源であり, 国内のMg金属需要の相当部分を「自給」可能

世界的にも大きな潜在的資源量(数100万ton?)

食塩生産工場等から排出される**苦汁**は有効なMg資源

海水中のMg: MgCl_2 → 熔融塩電解法にfit

+

苦汁を原料とすれば, **省エネ, 低CO₂排出化**も可能



廃海水を出発原料にし, 熔融塩電解法でMgを製造するプロセス

研究開発課題：資源産出国への実質的転換を実現する革新的マテリアルプロセス技術の開発に関する研究開発

参画機関：関西大学（竹中教授）、(株)戸畑製作所、産業技術総合研究所、東京大学（星野教授）、日本マグネシウム協会、（再委託）富山高等専門学校（井上教授）

テーマ名：濃縮海水を原料とするMgのグリーン新製錬技術開発

2021年度予算額：70百万円

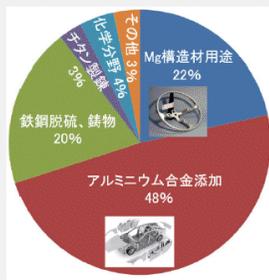
背景・目的

【背景】

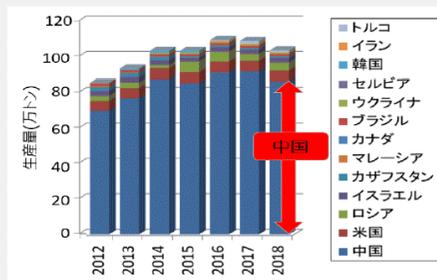
- Mg材料は、低CO₂排出社会の実現に不可欠な材料。
- 日本のMg需要は**3.5万トン(2019年)**。堅調な需要あり。一方、Mgの**99%は中国からの輸入に依存**。供給源の分散化、自国生産実現が喫緊の課題。
- Mgは海水中に豊富に存在し、日本ではベースメタルで唯一「**自給自足**」を実現できる可能性のある元素。
- 国内では年間**100万トンの食塩**が生産され、鹹水に代表される濃縮海水には8g/kgのMgCl₂が含有。その内**~2万トン(国内Mg需要の50%)はMgとして回収可能**。

【目的】

- 本プロジェクトでは、国内の製塩施設で生じてしまう「**廃水**」である**濃縮海水**を、**Mg金属として回収するための新製錬技術**を開発する。
- 加えて、濃縮海水よりMg金属を製錬する際の**環境的・経済的障壁**を明らかにし、**実用化可能性**を評価する。



国内Mg需要構成(2019)



世界のMg生産推移(2012~2018)

研究開発概要

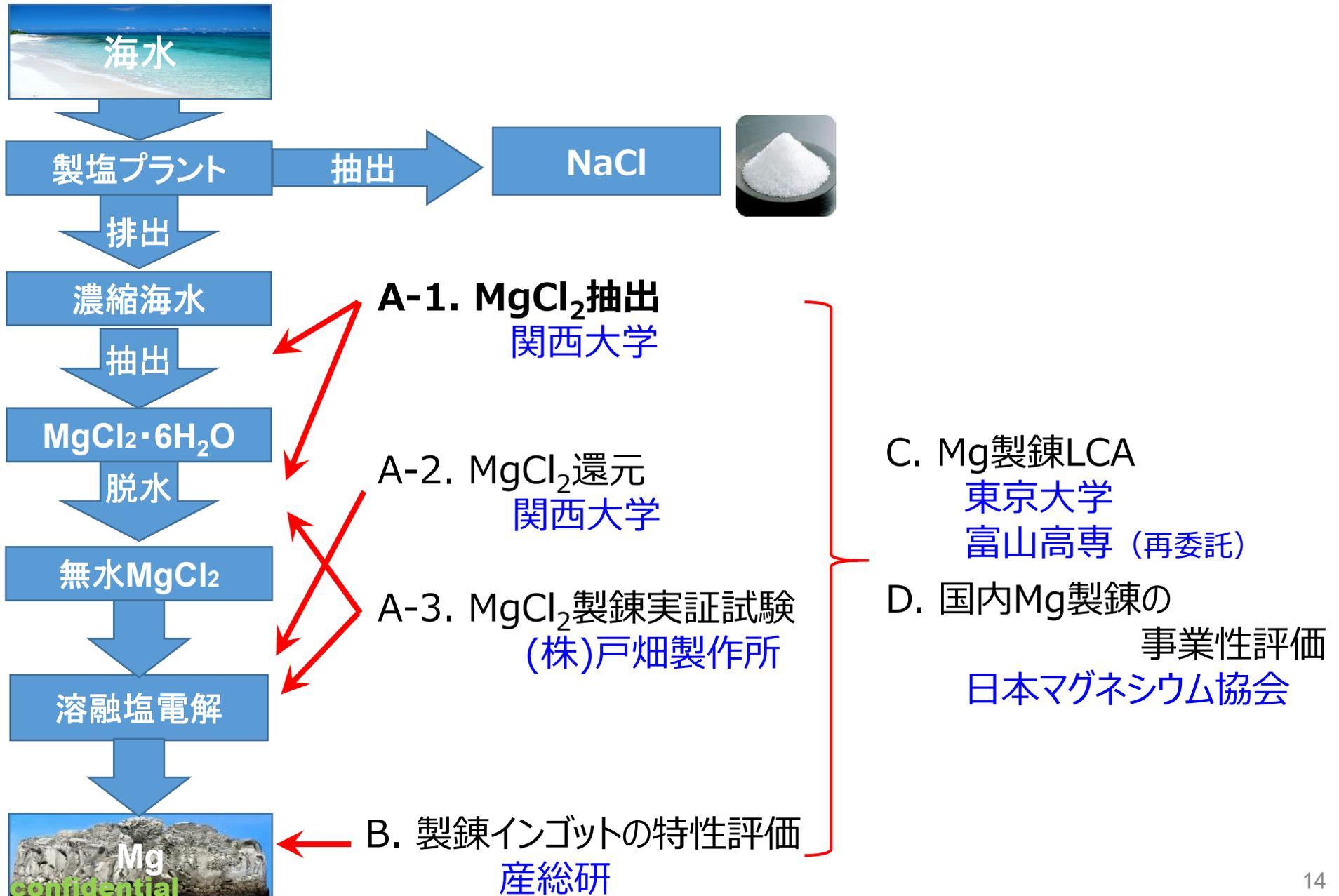
- 【研究項目A】濃縮海水から効率的にMg金属を生産する**技術の開発**（関西大学、戸畑製作所）MgCl₂・6H₂Oを出発材として、Mgを精錬するための脱水及び新規電解技術を開発。
- 【研究項目B】濃縮海水から精製したMgインゴットの**評価技術の開発**（産総研）海水由来の不純物がMgの各種特性（耐食性、機械的特性）に及ぼす影響を解明。
- 【研究項目C】Mgの物質・エネルギーフロー・リサイクル性の**評価技術の構築**（東京大学、富山高専）海水由来のMg製錬のCO₂排出量を試算し、既存製錬法と比較してその優位性を検証。
- 【研究項目D】濃縮海水よりMgを製造するために**技術・経済シナリオの構築**（日本Mg協会）海水由来のMg製錬を国内で実現するための**技術・経済シナリオ**を構築。

これらを密接に関連付け現実的なMg金属製造プロセスを開発

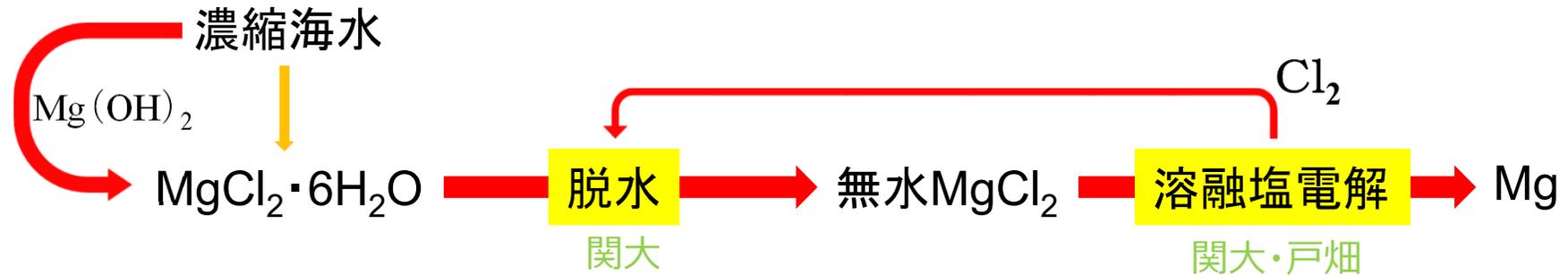


プロジェクトの研究開発スキーム

「濃縮海水を原料とするMgのグリーン新製錬技術開発」での役割分担



製造技術の検証と課題抽出 (研究項目A)



濃縮海水からの無水 $MgCl_2$ 効率的製造プロセスの構築

- 濃縮海水(鹹水・苦汁)からの純 $MgCl_2$ 水溶液直接製造プロセスに関する調査
- 市販 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ の乾燥法の実験的検証

熔融塩電解の最適化

- 濃縮海水由来原料に即した熔融塩電解プロセスの構築が必要
- 国内で操業した場合に、変動電力に耐える仕様が必要(自然エネルギー等の利用)

脱水・熔融塩電解のスケールアップ

- 試験片レベル(g単位)からパイロット試験機レベル(kg単位)へのスケールアップ
- 電力変動および不純物の混入が熔融塩電解の及ぼす影響の定量的な把握
- 濃縮海水由来 $MgCl_2$ を用いた熔融塩電解法の電力源単位等コスト試算を実施

想定される不純物のMg特性への影響 & 製錬Mgの評価 (研究項目B)

濃縮海水由来Mgインゴットの特性評価

- Mg中への遷移元素(Ni, Cu, Fe)の混入や、汎用元素 (Al, Zn, Mn) の添加が耐食性や機械的特製に及ぼす影響については系統的な調査がなされている。
- 一方、濃縮海水由来の不純物 (Ca, Na, K等) がMgインゴットの耐食性や機械的特製に及ぼす影響は不明な点が多い状態である。

Mgの物質フロー・リサイクル性の評価 (研究項目C)

海水由来のMg製錬プロセスのエネルギー・マテリアルフロー評価

- 既存データ及びPJで得られるデータを用いてMgのマテリアル・フロー、環境負荷の定量的な評価を実施

マグネシウムスクラップのリサイクル性調査

- Mg合金の通常のリサイクル（再溶解によるカスケードリサイクル）は、再溶解による合金から合金へのリサイクルであり、一部ではあるがデータが存在し、情報として得ることが可能
- Mg純度を99.99%までアップ可能である、各元素間の蒸気圧差を利用した真空蒸留製錬法に注目。LCA試算、コスト試算に必要なデータを取得し、水平（アップグレード）リサイクル法としての可能性を検討

国内生産を実現する上での基盤調査(研究項目D)

濃縮海水よりMgを製造するための技術・経済シナリオの構築

- 濃縮海水からMgを電解製錬により生産するためには技術開発が必要であるが、その技術開発が成功した場合の事業化可能性を経済性観点から評価
- 投資回収が可能であり、経常利益を見込むことができる操業条件を抽出
- 日本Mg協会内に委員会を設置し、Mg電解製錬事業を実施するポテンシャルを有する企業（Mg製錬メーカー、Ti製錬メーカー・・・等）を招聘し、濃縮海水よりMgインゴットを生産するに際しての技術、経済シナリオを共同で構築

まとめ

本先導研究の成果要約

- $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を出発原料とし、目標とした純度のMg金属を効率的に得る技術を実証し、大規模操業のための課題を明らかにした。また、実際に提案手法で得たMg金属は、実用に供しえる品質であった。
- 提案プロセスが、低 CO_2 排出量のプロセスとなりえることを示した。また、Mgマテリアルフローにおけるリサイクルの重要性が確認された。
- 蒸留法が、電解で製造したMg金属の精製だけでなく、アップグレードリサイクルにも適用可能であることを示した。
- Mgに関する世界情勢を分析した。また、国内におけるMgのニーズ等についても分析した。

今後の予定

- 製塩事業者、チタン製錬メーカーを加えて、スケールアップを目指す後継プロジェクトの立ち上げを目指す

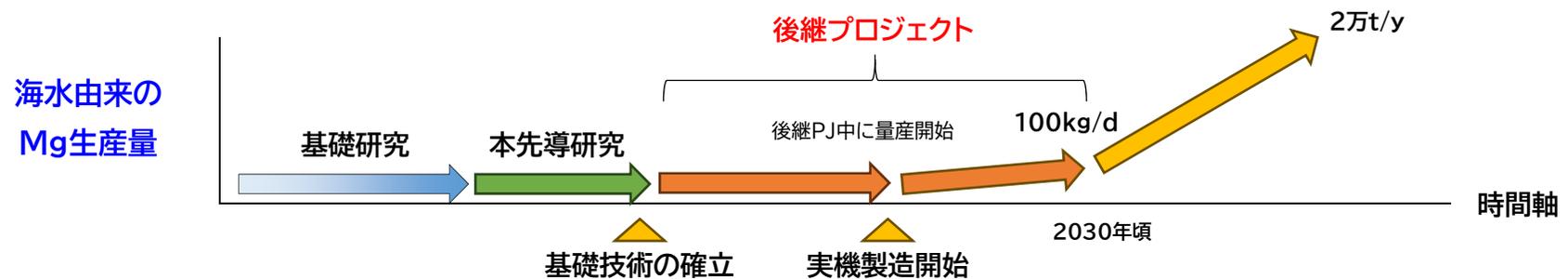
詳しくはNEDO様で公開予定の成果報告書をご参照ください

NEDO先導研究

意義の確認
技術的な可能性を証明
実現のための課題の抽出

今後の展開

先導研究の成果のパイロットプラント操業を含むプロジェクトへの展開にむけて動き出しています。



また、より大きな枠組みでの取り組みができないかについても検討中です。

日本国内でのMg金属地金の製造

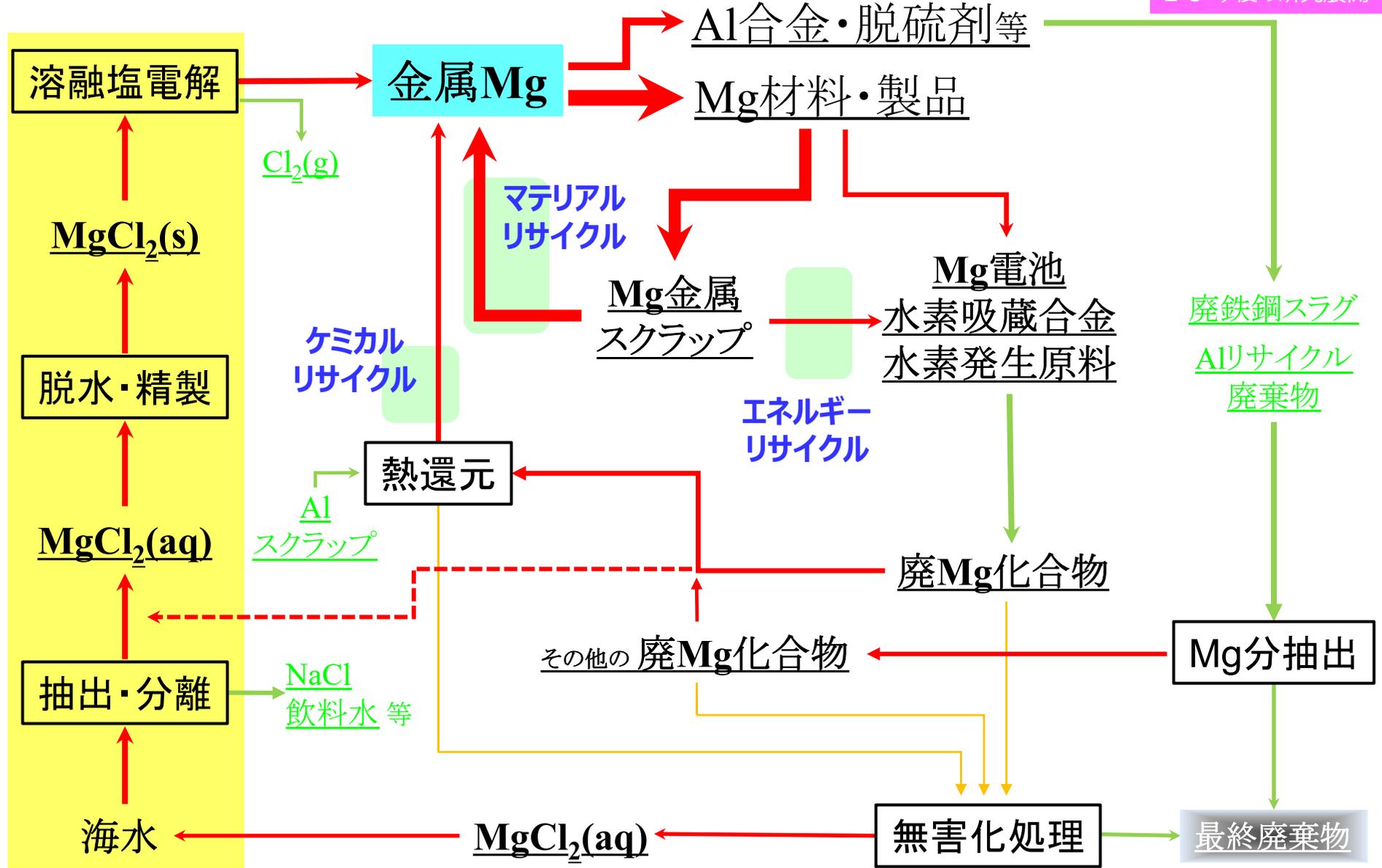
- ・可能な限り国産資源を用いること
- ・低環境負荷(省エネ・低CO₂排出)であること
- ・現実性を有すること(実現可能性, 工業的意義)



熔融塩電解法による製造 …… 廃海水の利用(先導研究)

熱還元法による製造 …… ドロマイトを原料としない
MgOベース原料

位置づけ



先導研究 (項目A)

— 有価値Mg
 — 無価値Mg
 — 非Mg

完結したマテリアルフローの構築 ⇒ 他の金属に対する優位性？

ゼロエミッション実現のためリサイクルは必須

マテリアルリサイクル: **金属** ⇒ **金属**

マテリアルリサイクルだけでの完結には高度技術が必要？

エネルギーリサイクル: **金属** ⇒ **エネルギー**

マテリアルリサイクルが困難な廃棄物の有効利用

Mg金属・合金は化学的に活性

副生する高濃度のMg化合物は製錬原料？

ケミカルリサイクル: **化合物** ⇒ **金属**

エネルギーリサイクル廃棄物は 主に濃縮したMg酸化物, 水酸化物
少量 & 多品種(不純物等)

鉄鋼製錬, Al合金リサイクルで発生するMg廃棄物も対象？



海水からのMg金属製造プロセスへの投入は可能

廃棄物にみあったケミカルリサイクルに適したプロセス？

溶融塩電解法とSi還元法の比較

		溶融塩電解	熱還元
原料		MgCl ₂	ドロマイト → 実際にはMgO
環境負荷	エネルギー	○	
	CO ₂ 排出	○	
生産性		連続	バッチ
	効率	○	
	稼働・停止		○
	電気への依存	大	小
品質			○
技術		高度	容易
設備		大規模	小規模

蒸留の内包
(不純物に鈍感)


 大量生産向き
 海水からの製造


 小回りがきく
 廃棄物のリサイクル

Si還元法での消費エネルギー, CO₂排出量 低減の可能性

AI

		エネルギー (MJ/kg-Mg)	CO ₂ 発生量 (kg/kg-Mg)
実際		220	30
計算上 (ΔH°)	フェロシリコン製造	12	3.6
	ドロマイト熱分解	12	5.5
	MgO, CaO, Si加熱	6	0.9
	MgOの還元	10	1.5
	計	~40	~15
	Mg廃棄物利用	~30	~10
	+ Alスクラップ利用	~20	~5

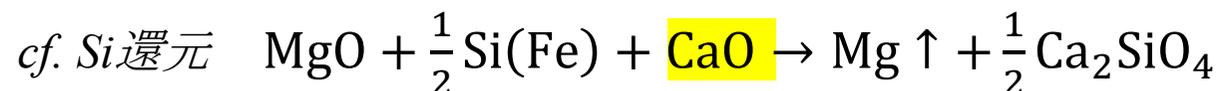
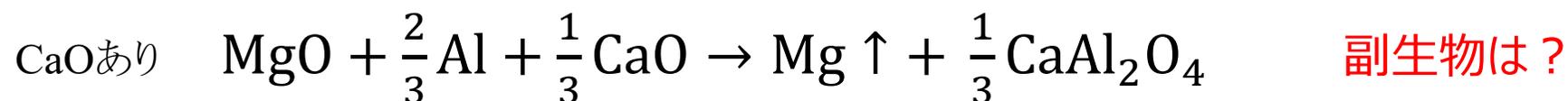
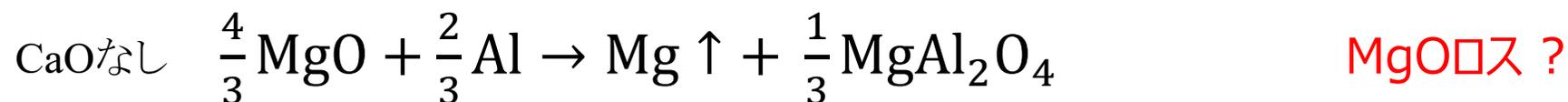
1/2にすることは可能?

MgO製造工程
CaO添加

小規模な酸化物系Mg廃棄物のAlスクラップ還元は魅力的

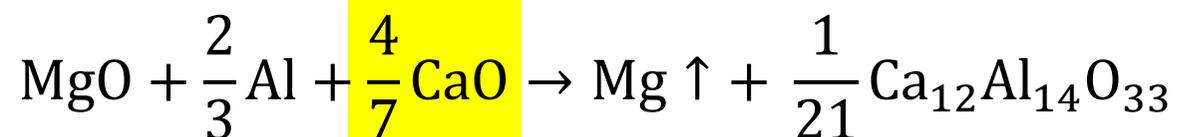
酸化物系Mg廃棄物の Alスクラップによる還元

反応式



課題：原料となるMgOの有効利用

CaO(副原料)添加量の検討



Si還元に対して必要CaO量は約60%

Alスクラップの還元剤としての利用

効率的なAlスクラップの利用(表面酸化が前提)

実験操作

原料: $\text{Mg}(\text{OH})_2$ *or*
Mg廃棄物 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ + 有機物)

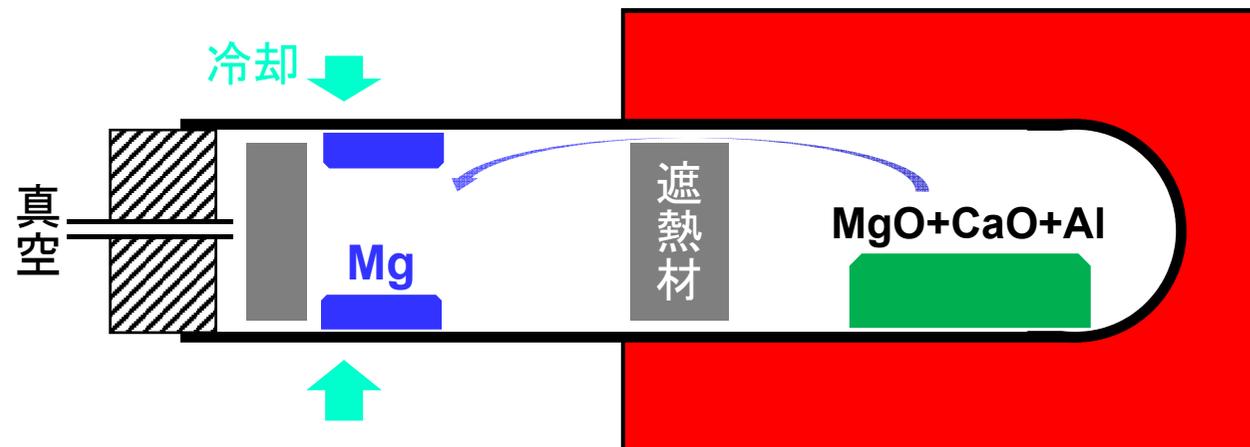
助剤: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

還元剤: Al粉, **Alスクラップ**

配合比: $\text{MgO} : \text{CaO} : \text{Al} = 3 : 2 : 2$

試料作成: (基本) 湿式混合 \Rightarrow 乾燥・煅焼

反応条件: 1150°C , 真空, 3hr ・・・反応は完全には終了していない



酸化物系Mg廃棄物の Alスクラップによる還元

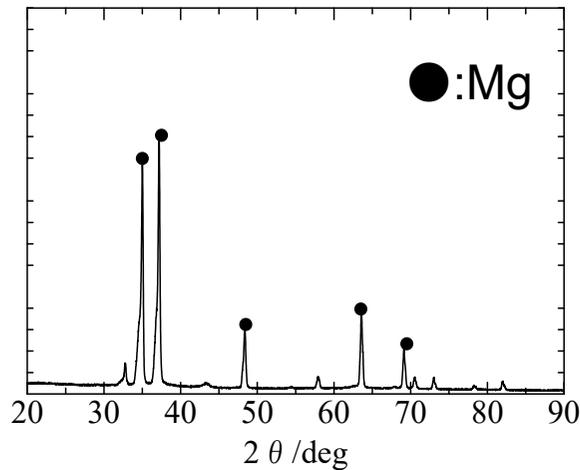
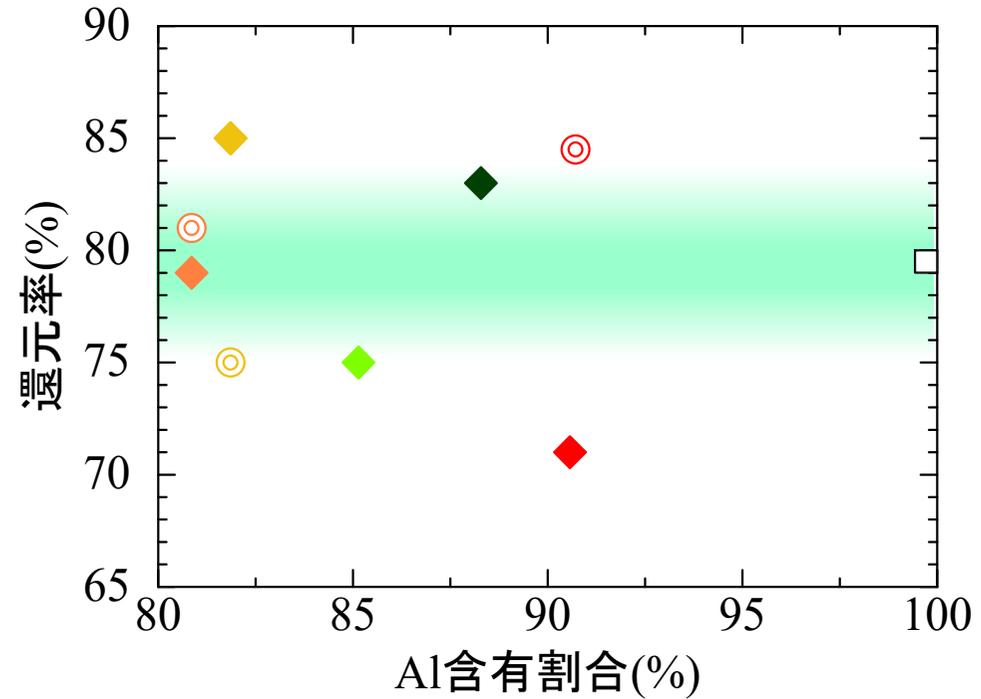


Fig. 還元生成物
Al粉+煅焼Mg廃棄物



Mg源	Al還元剤	
廃棄物	スクラップ	○ ○ ○
試薬	スクラップ	◇ ◇ ◇ ◇ ◇
試薬	Al粉	□

- ・乾燥・煅焼処理によりMg廃棄物試料も十分に利用可能
- ・AlスクラップによるMg廃棄物も還元可能

ただし、不純物の影響等の検討が必要

おわりに

1. Mg金属製造プロセスについて

金属製錬法の一般論

Mg製錬法

2. 日本国内でのMg金属の製造を目指して

先導研究プログラムのアウトライン

先導研究プログラムでの成果

今後の研究展開

皆様のご協力をお願いできれば幸いです

ご関心をお持ちでしたら、日本マグネシウム協会様にお問い合わせください

また、・成果報告書（NEDO様で公開予定）

・軽金属，74巻10号，463-470頁（2024）もご参照ください