

23.ケイ素 (Si)

23.1 需給動向

ケイ素(シリコン)の原料は珪石で、地殻に最も多く存在する酸素に次いで 2 番目に多いとされ、資源量・埋蔵量は非常に多い。しかし、工業用金属シリコンの生産に利用出来る良質の珪石は限られた地域でのみ採掘されている。珪石は電気炉で精錬され金属シリコンとなり、最終用途は電子機器・通信機器等の半導体、太陽電池部材、シリコン樹脂、アルミニウム添加剤、鋼材添加材、炉剤・機械部品等幅広い。現在、日本では珪石からの精錬は行っておらず、金属シリコンや合金鉄などの中間製品を全て輸入している。世界のフェロシリコンと金属シリコンの生産量を表 1 に示す。米国地質調査所(United States Geological Survey:USGS)によれば、世界のシリコン生産のうち、約 5 分の 4 はフェロシリコンが占めると見られている。日本の主要輸入相手国である中国が、世界生産全体の生産量の 6 割を占めており、圧倒的に多い。

表1 フェロシリコン、金属シリコンの生産

単位:純分千t

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	05-10平均
中国	2,360	2,900	3,300	4,000	4,310	4,600	3,578
インド	—	38	—	40	59	68	51
カザフスタン	68	68	68	—	—	—	68
ウクライナ	161	84	109	99	98	120	112
ロシア	526	541	635	605	537	610	576
マケドニア	—	—	39	—	—	—	39
アイスランド	78	74	74	73	81	93	79
ノルウェー	278	150	221	235	301	330	253
フランス	1,398	124	164	112	66	69	322
スペイン	55	55	78	—	—	—	63
南アフリカ	131	144	149	154	116	130	137
アメリカ	270	146	155	164	139	170	174
カナダ	66	66	66	72	53	59	64
ブラジル	226	226	270	259	224	240	241
ベネズエラ	60	60	61	61	54	62	60
その他	289	297	180	288	266	290	268
合計	4,720	4,970	5,590	6,160	6,304	6,900	5,774

出典:USGS

中間製品は金属シリコン、合金鉄系シリコン、炭化物の 3 種に分けられる。金属シリコンは半導体・太陽電池部材に用いられる高純度金属シリコンと、化学品・アルミ添加剤に用いられる低純度金属シリコンに分類される。高純度シリコンは、金属シリコンと塩素を反応させ四塩化ケイ素(ガス化)とし、これを蒸留して純度の高い製品を得る。

集積回路などの半導体素子に使用する超高純度のケイ素(純度 11N 以上)(SEG-Si)は、高純度シリコンからさらに FZ(フローティングゾーン)法などのゾーンメルティングや Cz(チョクラルスキー)法などの単結晶成長法により製造される。現在は、半導体の高集積化により、高純度化が進んでいる。また、韓国の OCL、KC もこの市場に参入し始めたことから、一部の日本のメーカーもマレーシアに製造拠点を建設し、海外メーカーへの対応を進めている。

太陽電池には、半導体ほどの高純度は必要なく、6N 程度の純度で、また多結晶成長法での製造でもよく、製造法も半導体級のプロセスを簡略化した方法が多い。日本ではソーラーグレードシリコンは、9N を推奨している。また、ソーラーグレードシリコンの市場規模は数年前から増加していたが、韓国 OCL、独 Wackerbei、米 Hemlock、MEMC などの大手企業が参入し、現在では、日本企業のシェアは 20%程度となっている。

太陽光用金属シリコンは、ポリシリコンと言われる。2010年の世界生産量は30万tとみられ、年率40%の割合で増加している。30万tの生産に必要な金属シリコンは60万tと考えられ、表1の世界合計の約10%に相当する。なお、世界のポリシリコンの生産能力は年間50万tとみられている。生産能力に余力があることに加え、太陽光発電の変換効率からみてシリコンは優位であるため、供給不足での価格の大幅な上昇は考えられず、今後はポリシリコンの需要が高まっていくと考えられる。

現在の太陽光発電の消費地は、欧州65%、日本5%、米国10%で残りが中国、東南アジア等であり、欧州での需要が多い。今後は米国、中国の需要が伸長するものとみられている。

太陽光モジュールメーカーではサンテック、英利緑色エネルギーが世界の1、2位であり、シャープや京セラなどの日本メーカーは、中国に拠点を設立し、中国産のセルを購入することで価格競争力をつけようとしているが、日本での生産量は激減しているのが現状である。

フェロシリコンは、フェロマンガなど合金鉄の一種であり、その用途は製鋼原料(鉄鋼及び鋳物用)である。過去日本でも生産していたが、現在では輸入フェロシリコンを加工し、国内及び海外に供給されている。シリコマンガについては、12.マンガンを参照されたい。

炭化ケイ素は硬度が大きく、化学的にも安定なことから耐火物、研磨材として使用される。最近の用途としてはファインセラミックスとしての用途も重要であり、窒化ケイ素と共に高温構造材の代表的な材料となっている。その他ハイテク分野では半導体製造装置の拡散炉部材であるライナーチューブ、プロセスチューブ、ボード類等がある。この他ケイ素材料用途としては珪石そのものをSiO₂として使うガラス及び窯業分野がある。

23.2 輸出入動向

(1) 金属シリコン

我が国のシリコン系中間製品の輸出入量を表2に示す。2010年の多結晶シリコンの輸入は、前年比24.1%増の15,048t、単結晶シリコンは前年から17.0%減少し4,866tとなった。低純度金属シリコンは前年比46.7%増と大幅に増加し、21万4,993tであった。

輸出は高純度金属シリコン及び太陽光グレード用シリコンが、前年比43%増加し、12,169tとなっている。財務省貿易統計では、多結晶、単結晶が区別されていない。また、新金属協会が集計した2010年の単結晶シリコンの輸出量は前年比46%増の4,633tで、増加の要因はアジアのメモリ関連及びファブリーメーカーのシリコン消費の増加によるものとみられる。単結晶の輸出量4,633tを表2の高純度金属シリコンの輸出量に当てはめると、単結晶の比率は約38%となる。

(2) フェロシリコン

フェロシリコンの輸出は前年比68%増の8,489tであった。輸出については前述のように輸入したフェロシリコンの再輸出、もしくは輸入したフェロシリコンを二次加工したものの輸出であり、輸出量のうち、Si品位が55%以下のものが中心となっている。これは大半が輸入フェロシリコンを二次加工した銑鉄鋳物用の接種剤と見られ、タイやインドネシアなどの東南アジア向けが中心となっている。

フェロシリコンの輸入は輸出と同様に、激減していた2009年から一転し2008年以前の水準を取り戻している。2010年は前年比63.4%増の8,489tであった。輸入相手国は、中国、ブラジル、ロシアの3カ国で約9割を占める。このうちブラジルからの輸入については、鉄鋼メーカーや商社が保有する生産拠点からの調達が含まれている。具体的には、丸紅が日本重化学工業、ブラジル合金鉄大手Ferbasa社と合併で設立したSilicio de Alta Pureza da Bahia S.A.(SILBASA)

で不純物の少ない高純度フェロシリコンを生産し、販売している。また、大阪特殊合金も 100%子会社である Inonibras で高純度フェロシリコンを生産し、日本へ輸入している。これらの高純度シリコンは、電磁鋼板のシリコン添加剤や鋳鉄鑄物用の接種剤の主原料として使用されている。

また、JFE スチールもブラジル Nova Era 社でフェロシリコンを生産しており、中国のオールドスマンガンアロイではシリコマンガンを生産している。日本重化学工業もブラジルの Bozel Mineracao S.A.にてカルシウムシリコンを生産している。

炭化ケイ素の輸入は前年比 125.1%増の 85,830t、輸出は前年比 147%増の 14,147t となっている。各品目の輸出入量は、世界的な景気後退の影響による大幅な減少がみられた 2009 年から 2008 年以前の水準に戻る傾向にある。

表2 日本のシリコン系中間製品の輸出入量

単位: 純分t

			2006	2007	2008	2009	2010
金属シリコン	高純度金属シリコン	輸入	13,396	15,092	17,520	17,985	19,914
		輸出	5,923	6,778	8,364	8,496	12,169
	うち多結晶	輸入	8,641	9,501	11,553	12,122	15,048
		輸出	—	—	—	—	—
	うち単結晶	輸入	4,755	5,591	5,967	5,863	4,866
		輸出 ¹⁾	4,554	5,198	4,366	3,181	4,633
	低純度金属シリコン	輸入	238,276	252,025	240,683	146,980	214,993
		輸出	899	1,665	1,177	874	646
	計	輸入	251,672	267,117	258,203	164,965	234,907
		輸出	6,822	8,443	9,541	9,370	12,815
輸入－輸出		244,850	258,674	248,662	155,595	222,092	
合金鉄	フェロシリコン	輸入	407,551	418,358	459,224	239,576	417,252
		輸出	3,914	5,762	6,881	5,186	8,489
	シリコンマンガ	輸入	41,093	52,595	52,994	22,135	40,088
		輸出	5	4	62	6	8
化合物	炭化ケイ素	輸入	72,650	75,705	93,256	38,125	85,830
		輸出	8,067	8,317	8,834	5,728	14,147
合計	輸入	780,966	821,775	871,677	472,801	7,860,077	
	輸出	18,808	22,526	25,318	20,290	35,459	
	輸入－輸出	762,158	799,249	846,359	452,511	7,824,618	

出典: 財務省貿易統計 1)新金属協会シリコン部会

換算率: フェロシリコン75%、シリコンマンガ15%、炭化ケイ素80%

23.3 価格動向

シリコン系中間製品の輸出入価格動向を表 3、表 4 に示す。また、図 1、図 2 に金属シリコンの輸出入価格動向を示す。単結晶の輸入は、世界的な景気後退の影響を受け 2009 年に水準が低下し、2010 年は消費量の増加とともに上昇に転じた。多結晶は、07 年以前の水準に戻る傾向にある。高純度金属シリコンの輸出は単結晶、多結晶が区分されていないが、輸出されたシリコンは半導体や太陽電池へ使用されていると見られる。輸出価格は、輸入価格と同様に、2008 年以降は高騰前の水準に戻る傾向にある。

表3 シリコン系中間製品の輸入価格

単位: 特記以外\$/kg

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	10/01比
高純度単結晶金属シリコン	94	110	111	92	105	130	140	152	108	115	122%
高純度多結晶金属シリコン	39	37	35	36	42	54	75	80	73	63	162%
低純度金属シリコン	0.95	0.92	1.03	1.22	1.2	1.23	1.55	2.56	2.22	2.52	265%
フェロシリコン	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	200%
シリコンマンガ	0	0	0	1	1	1	1	2	1	1	222%
炭化ケイ素	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	200%

出典: 財務省貿易統計

表4 シリコン系中間製品の輸出価格

単位: 特記以外\$/kg

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	10/01比
高純度金属シリコン	55	55	48	51	56	75	95	156	83	70	127%
低純度金属シリコン	17.05	13.49	32.66	43.83	42.83	39.53	24	88	64	47	276%
フェロシリコン	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	200%
シリコンマンガ	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	200%
炭化ケイ素	2	2	2	3	4	5	5	6	5	5	250%

出典: 財務省貿易統計

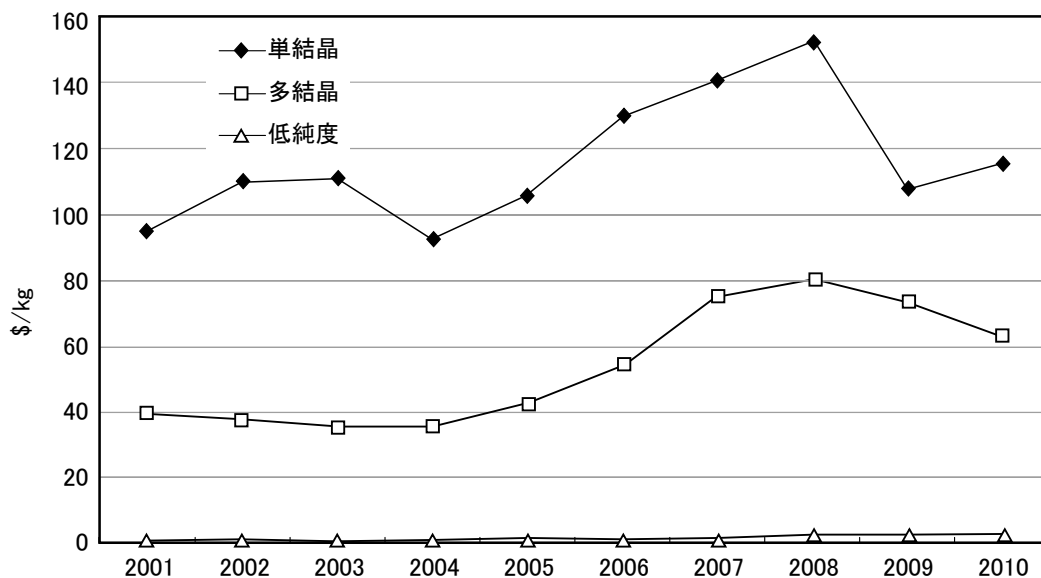


図1 金属シリコンの輸入価格

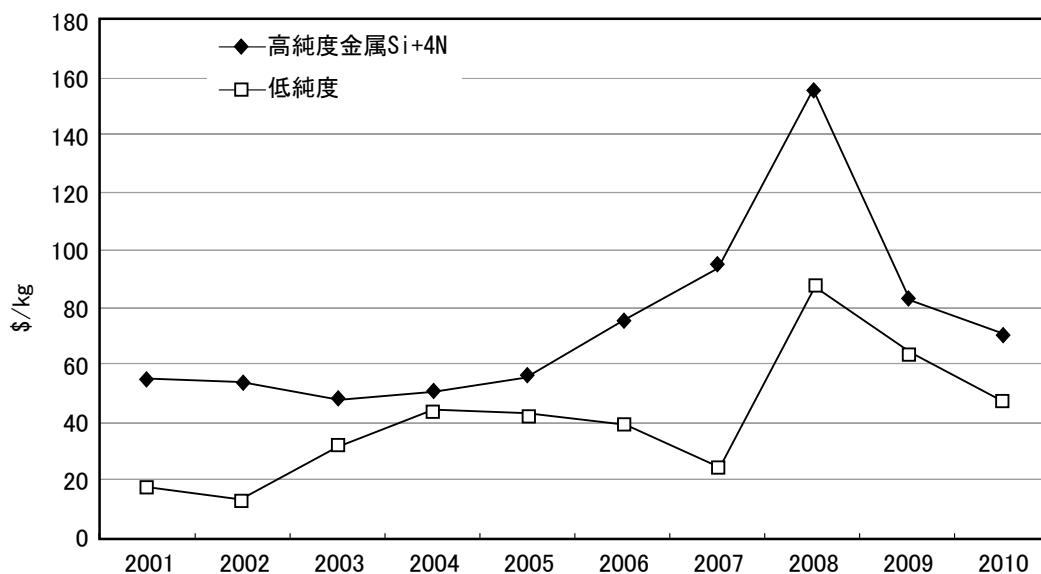


図2 金属シリコンの輸出価格

23.4 国内市場

単結晶シリコンの国内需給を表5に示す。2010年の国内生産は前年比36.9%となり、過去最高を記録した。需要についても、半導体市場が堅調であったことから、国内消費は32.9%増となっている。しかし、秋口以降、半導体市場は調整局面となった。欧米景気の減速により、PCの販売が減少したことや、DRAM価格の低下、さらには景気刺激策が一巡したことが主な要因と見られる。輸出は大幅に増加しており、需要全体に占める割合が前年の49%から52%に増加している。これについては、前述のようにアジアの消費量増加によるものと見られる。

参考として、多結晶シリコンの生産量の推移を表6に示す。表6の生産のうち、ほとんどは単結晶へ振り向けられるが、一部は太陽光発電に使用されている。

表5 単結晶シリコンの国内需給 単位:純分t

		2005	2006	2007	2008	2009	2010
供給	国内生産	6,257	7,091	8,288	8,362	6,344	8,688
	輸入	4,509	4,755	5,591	5,967	5,863	4,866
	合計	10,766	11,846	13,879	14,329	12,207	13,554
需要	国内消費	3,387	3,883	4,164	4,287	3,260	4,332
	輸出	3,768	4,554	5,198	4,366	3,181	4,633
	合計	7,155	8,437	9,362	8,653	6,441	8,965
需要-供給		-3,611	-3,409	-4,517	-5,676	-5,766	-4,589

出典:新金属協会シリコン部会、財務省貿易統計

表6 多結晶シリコンの生産 単位:純分t

	2005	2006	2007	2008	2009	2010
多結晶シリコン	6,892	6,987	7,364	7,471	8,633	6,806

出典:新金属協会シリコン部会

23.5 我が国の主要生産者並びに生産品目

中間生成物に係る我が国の主要生産者並びに生産品目は次のとおりである。

表8 中間生産物に関する主要生産者及び生産品目

主要生産者	生産品目
信越半導体	シリコンウェハ
SUMCO	シリコンウェハ
コバレントマテリアル	シリコンウェハ
シルトロニック・ジャパン	シリコンウェハ
エム・セテック	シリコンウェハ
トクヤマ	多結晶シリコン
大阪チタニウムテクノロジーズ	多結晶シリコン
日本電工(新日鉄系)	シリコマンガ
中央電気工業(住友金属系)	シリコマンガ
神戸製鋼所	シリコマンガ
東洋電化	フェロシリコン
日本重化学工業	シリコマンガ粉

出典:各社ウェブサイト

表 9 太陽光ポリシリコンメーカー

主要生産者	生産品目
三菱マテリアル	ポリシリコン

出典：ウェブサイト

23.6 海外投資の状況

我が国企業による海外投資の状況は表 10 のとおりである。

表 10 我が国企業による海外投資の状況

現地法人名	所在地域	主たる株主	生産品目
Silicio de Alta Pureza da Bahia S.A.(SILBASA)	ブラジル	丸紅 24.62%、日本重化学工業 24.12%	高純度フェロシリコン
Inonibras S.A.	ブラジル	大阪特殊合金 100%	高純度フェロシリコン
Nova Era Silicon S.A.	ブラジル	JFE スチール 74.5%、三菱商事 25.5%	フェロシリコン
Bozel Mineracao S.A.	ブラジル	日本重化学工業 100%	カルシウムシリコン
オールドスマンガンアロイ	中国	JFE スチール 24.5%、三井物産 24.5%	シリコマンガ
錦州日電合金鉄有限公司	中国	日本電工 10%、豊田通商 25.6%	シリコマンガ

出典：各社ウェブサイト、他

23.7 リサイクルの現状と評価

高純度金属シリコンは単結晶・多結晶共に高価なこともあり加工工程で発生したスクラップは基本的に全て回収される。特に多結晶金属シリコンスクラップの受け皿として、太陽電池インゴットウェハの用途が確立されている。また、IC メーカーの製造工程で発生するシリコンウェハのスクラップは、太陽光発電用の原料またはアルミ合金添加剤としてリサイクルされる。但し、切断時での切粉については、汚泥となって現在、産廃処理として、セメント原料が埋立てとして利用されており、本件での処理について研究がされている。

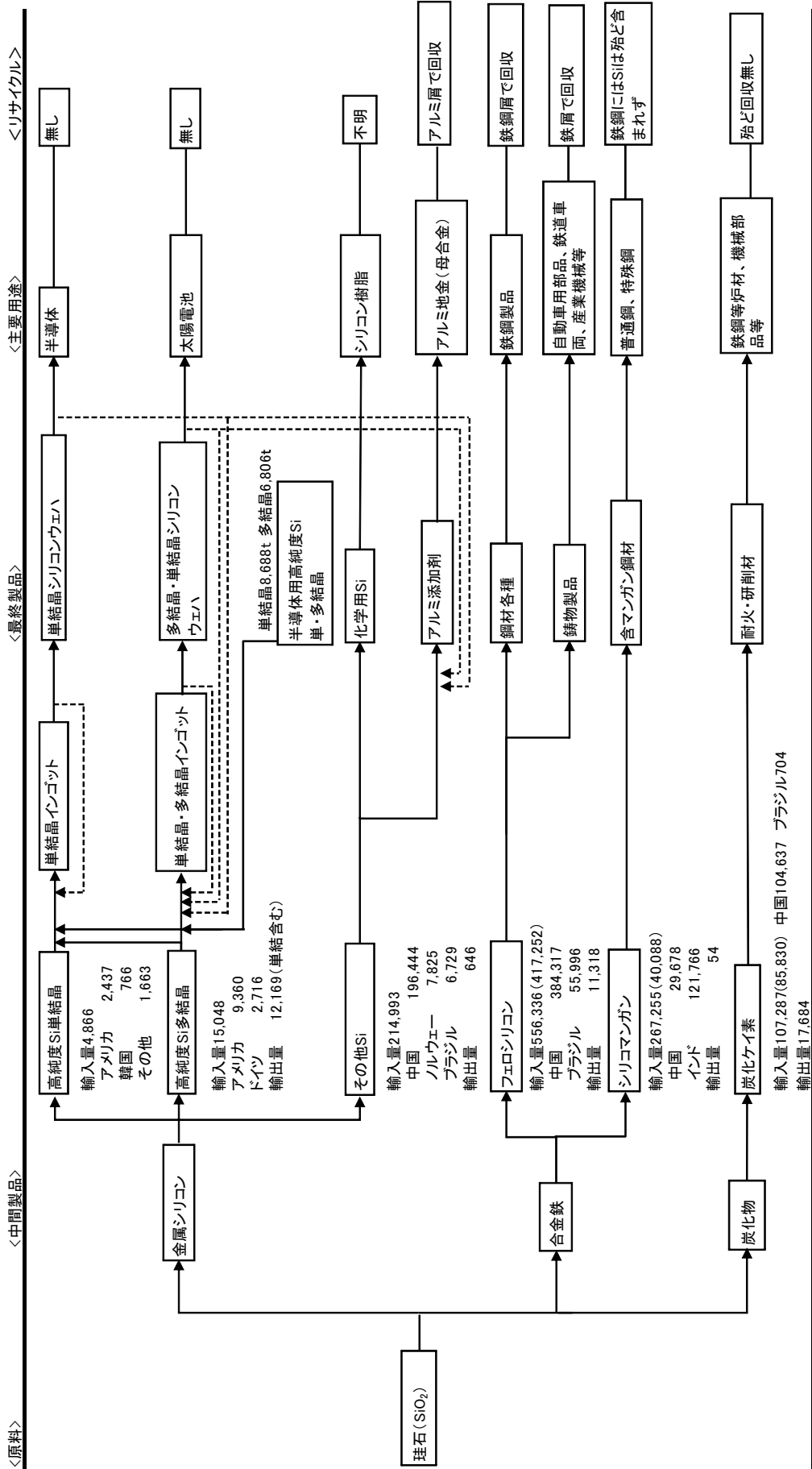
シリコン樹脂は、現状は産業廃棄物として処理されている。未だそのリサイクルシステムは確立されておらず今後の課題と思われる。アルミ地金・鉄鋼用シリコンは基本的に屑（鉄、アルミスクラップ）として回収されているが、電磁鋼板（Si 含有量 2～4.5%）に添加されるシリコンはむしろ普通鋼材としては不純物扱いとされるところもあり、有効利用という面では未だ問題が残されている。

炭化ケイ素から作られる炉材・機械部品等の使用済み製品からの回収はその効率性の面からほとんど行われていないと見られる。

ケイ素(Si)のマテリアルフロー(2010)

2010年ベース 単位:()内はSi純分、その他はマテリアルト

→ :原料・製品のフロー
 - - - :スクラップのフロー



2. 換算率 フェロシリコン: 75% シリコマンガ: 15% 炭化ケイ素: 80%

1. 鉱石埋蔵量(Reserves): NA.(USGS:MCS 2011)

3. 出典: 工業レアメタル2011、財務省貿易統計、新金屬協会

ケイ素(Si)

リサイクルの現状

主な応用製品	利用形態	使用済みの存在形態 形態	リサイクル形態		リサイクルの現状 評価(A~G) (注③)	備考 (注④)
			リサイクルの実態	リサイクル率		
単結晶シリコン ウエハ	半導体	廃棄パソコン、 廃棄家電等	不明	不明	E	工程スクラップは回収
太陽電池インゴット ウエハ	太陽電池	廃棄ソーラ	不明	無し	G	切断時の切粉を含めた 汚泥として産廃処理
化学用シリコン	シリコン樹脂	家電等	不明	無し	E	産業廃棄物として処理
電磁鋼板等	モータ・自動車用鋼板等	鉄鋼屑	不明	鋼材として回収	B	高炉用の添加剤又は輸 出(電炉で炉材として使 用)
硬度鋼材	レール等	鉄鋼屑	不明	鋼材として回収	B	電炉又は海外へリロー ル材輸出
Sic	炉材・機械部品等	再生	不明	回収	B	脱酸剤として再利用

注 ①の量の単位：
()は使用量純分t
その他は発生量純分t

②リサイクル：
()内は推定耐用年数
その他は実リサイクル量

③現状評価
A.応用製品が消耗品である
B.添加物として使用されている
C.リサイクルの流通システムがない
D.効果的なリサイクル技術がない
E.経済性がない
F.需要開発が十分になされていない
G.その他

④リサイクルのボトルネック
と、解決の難易度
毒性、保管の危険性の有無等