

*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

図-5 細分類別投入量

表-15 主な年の細分類別投入量

(単位：百万トン)

年	建築	道路	海岸保全施設	交通インフラ	ライフライン	他社会基盤
1990	13.6	1.5	0.9	0.5	0.2	1.4
1995	10.0	1.2	0.6	0.6	0.2	1.3
2000	10.3	1.4	0.5	0.4	0.1	0.9
2005	10.0	1.0	0.4	0.4	0.1	0.7
2010	7.8	0.8	0.3	0.3	0.1	0.5
2014	9.4	0.8	0.4	0.3	0.1	0.5
2015	8.9	0.7	0.3	0.3	0.1	0.4
年	輸送機器	家電	電池・照明等	他耐久消費財	その他（製品用原材料等）	その他（次工程用）
1990	15.9	1.8	0.7	0.9	6.1	3.8
1995	13.1	1.4	0.5	0.7	4.7	3.2
2000	13.1	1.2	0.6	0.6	3.9	3.2
2005	16.7	0.9	0.6	0.6	4.4	2.7
2010	15.7	0.7	0.5	0.5	3.6	1.7
2014	13.6	0.6	0.4	0.5	3.4	1.6
2015	13.1	0.7	0.4	0.4	3.1	1.5
年	その他（販売業者向け等・最終用途不明）					
1990	24.6					
1995	21.5					
2000	20.7					
2005	17.1					
2010	12.1					
2014	14.0					
2015	13.0					

*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

② 退役量

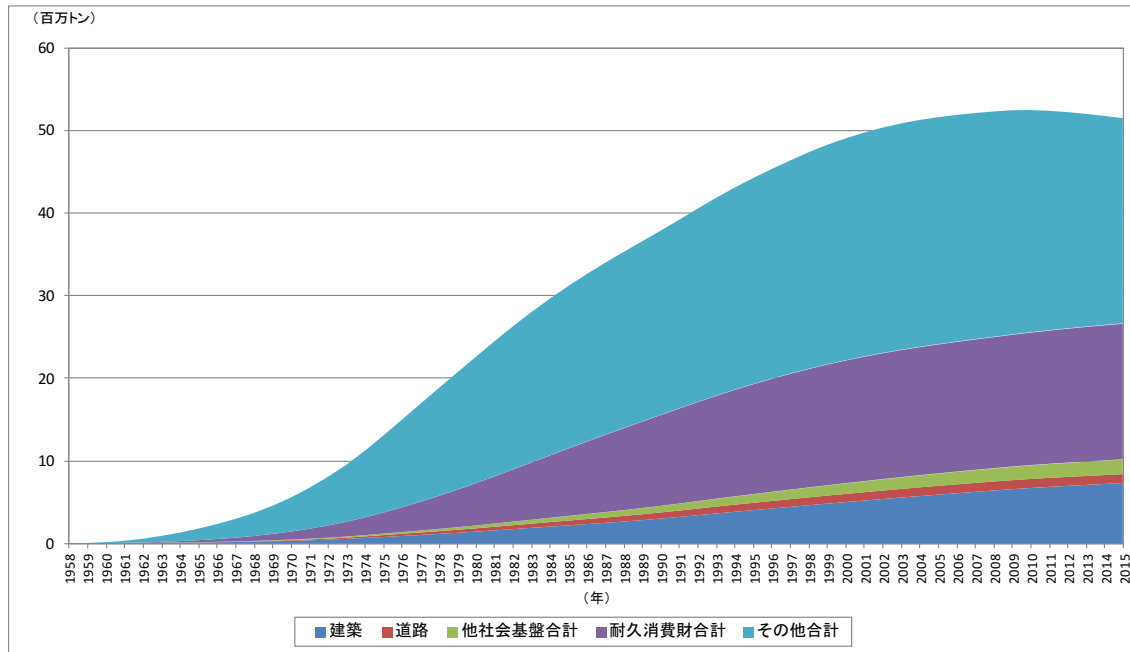
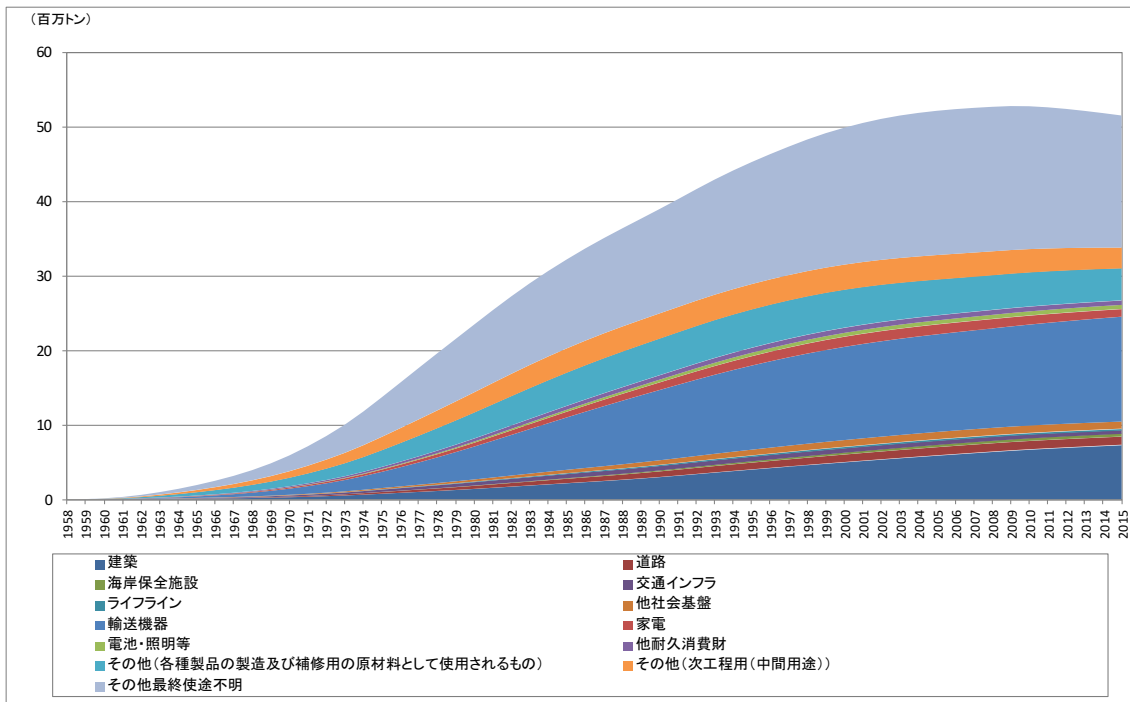


図-6 分類別退役量

表-16 主な年の分類別退役量

(単位: 百万トン)

年	建築	道路	他社会基盤	耐久消費財	その他	合計
1990	3.0	0.7	0.8	11.0	22.3	37.9
1995	4.0	0.9	1.0	13.3	25.0	44.3
2000	5.0	1.0	1.3	14.9	26.9	49.1
2005	5.9	1.1	1.5	15.6	27.5	51.6
2010	6.7	1.1	1.7	16.1	26.9	52.5
2014	7.2	1.1	1.8	16.4	25.3	51.8
2015	7.3	1.1	1.8	16.5	24.9	51.5



*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

図-7 細分類別退役量

表-17 主な年の細分類別退役量

(単位：百万トン)

年	建築	道路	海岸保全施設	交通インフラ	ライフライン	他社会基盤
1990	3.0	0.7	0.1	0.6	0.2	0.6
1995	4.0	0.9	0.2	0.6	0.2	0.8
2000	5.0	1.0	0.3	0.6	0.2	0.9
2005	5.9	1.1	0.3	0.6	0.2	1.0
2010	6.7	1.1	0.4	0.5	0.2	1.0
2014	7.2	1.1	0.4	0.5	0.2	1.0
2015	7.3	1.1	0.4	0.5	0.2	1.0
年	輸送機器	家電	電池・照明等	他耐久消費財	その他（製品用原材料等）	その他（次工程用）
1990	9.4	1.0	0.4	0.6	4.9	3.4
1995	11.3	1.2	0.5	0.7	5.2	3.4
2000	12.5	1.4	0.5	0.7	5.1	3.4
2005	13.2	1.3	0.5	0.7	4.8	3.3
2010	13.6	1.2	0.5	0.6	4.6	3.1
2014	14.0	1.0	0.5	0.6	4.4	2.9
2015	14.1	1.0	0.5	0.6	4.3	2.8
年	その他（販売業者向け等・最終用途不明）					
1990	14.0					
1995	16.4					
2000	18.4					
2005	19.4					
2010	19.2					
2014	18.1					
2015	17.8					

*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

③ストック量

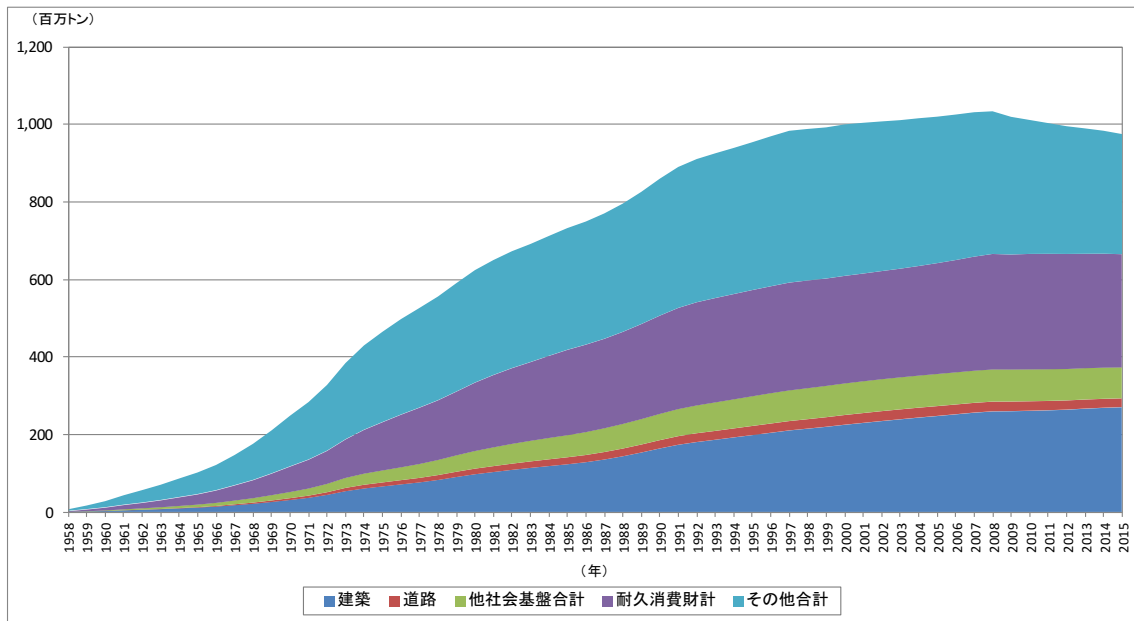
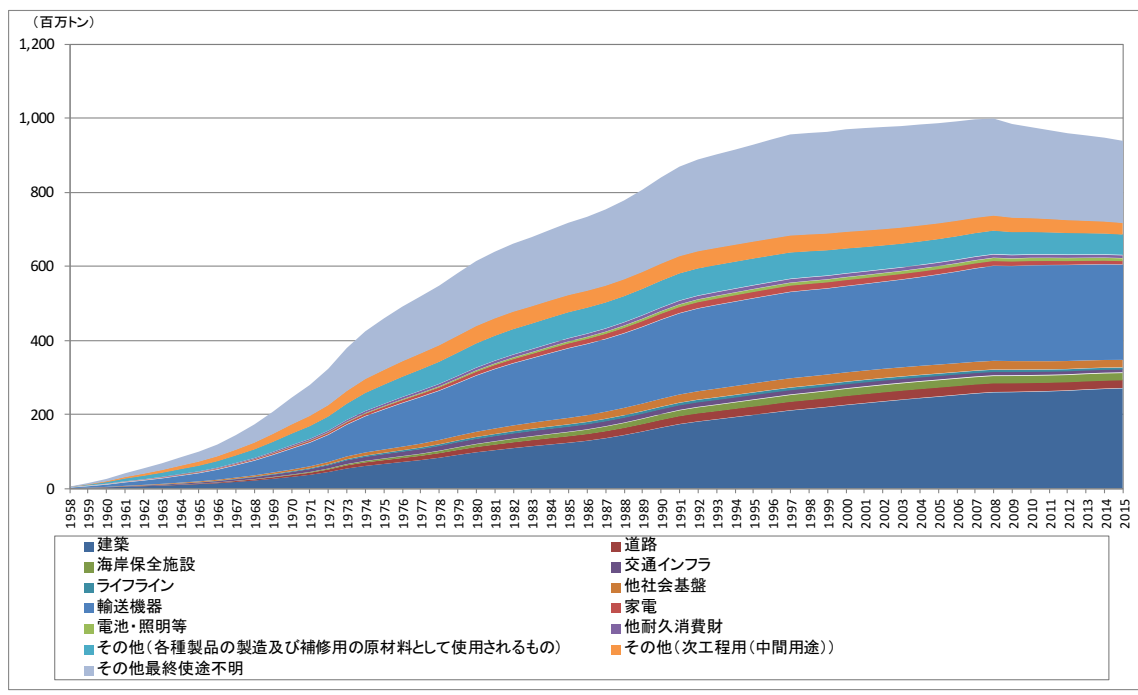


図-8 分類別ストック量

表-18 主な年の分類別ストック量

(単位：百万トン)

年	建築	道路	他社会基盤	耐久消費財	その他	合計
1990	164.2	21.2	68.0	253.0	353.2	859.6
1995	198.7	23.3	76.8	273.5	572.3	953.7
2000	225.4	24.8	81.6	277.1	608.9	999.8
2005	248.0	25.1	83.1	285.5	641.7	1019.6
2010	261.5	24.1	82.4	297.5	345.7	1011.2
2014	269.2	22.7	80.6	293.6	666.1	983.3
2015	270.8	22.3	80.0	291.7	664.8	974.8



*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

図-9 細分類別ストック量

表-19 主な年の細分類別ストック量

(単位：百万トン)

年	建築	道路	海岸保全施設	交通インフラ	ライフライン	他社会基盤
1990	164.2	21.2	15.0	13.9	6.9	21.1
1995	198.7	23.3	17.7	13.4	7.0	24.1
2000	225.4	24.8	19.5	12.6	6.8	24.7
2005	248.0	25.1	20.0	11.5	6.3	23.9
2010	261.5	24.1	19.8	10.6	5.9	22.3
2014	269.2	22.7	19.7	9.8	5.5	20.4
2015	270.8	22.3	19.7	9.6	5.3	19.9
年	輸送機器	家電	電池・照明等	他耐久消費財	その他（製品用原材料等）	その他（次工程用）
1990	213.1	16.5	6.9	9.0	72.5	47.7
1995	229.2	17.9	7.6	9.4	72.1	47.4
2000	232.4	17.2	7.8	9.0	67.2	46.6
2005	242.7	15.3	8.1	8.6	63.0	44.3
2010	257.9	13.0	8.2	7.9	60.6	39.0
2014	257.7	11.0	7.8	7.3	56.6	34.0
2015	256.7	10.7	7.7	7.2	55.4	32.7
年	その他（販売業者向け等・最終用途不明）					
1990	233.0					
1995	261.9					
2000	277.0					
2005	270.6					
2010	246.0					
2014	226.6					
2015	221.9					

*項目ごとに残存率のパラメーターを変えているので、大分類での合計値とは一致しない。

輸送機器（乗用車＋商用車）

① 投入量

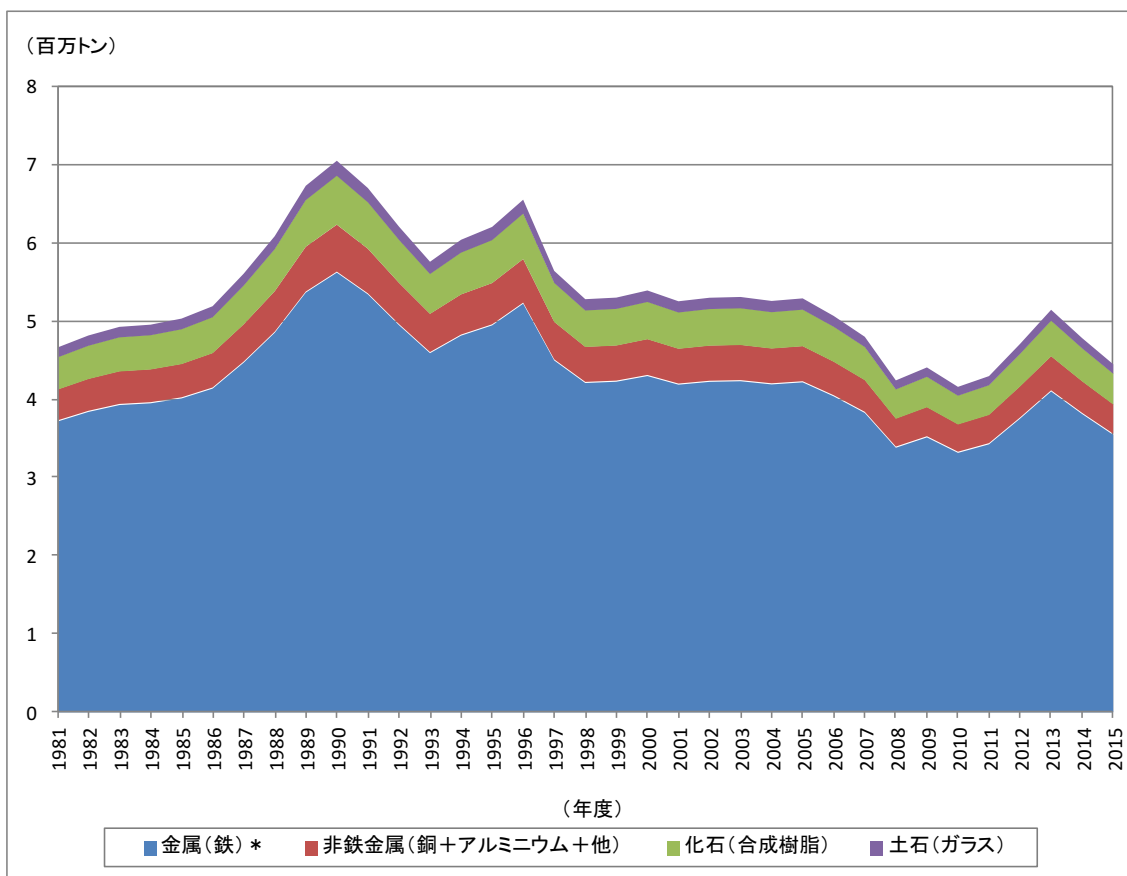


図-10 自動車（乗用車＋商用車）の資源別投入量

表-20 主な年の自動車の資源別投入量

(単位：百万トン)

年度	金属(鉄)*	非鉄金属(銅+アルミニウム+他)	化石(合成樹脂)	土石(ガラス)
1990	5.6	0.6	0.6	0.2
1995	4.9	0.5	0.6	0.2
2000	4.3	0.5	0.5	0.1
2005	4.2	0.5	0.5	0.1
2010	3.3	0.4	0.4	0.1
2014	3.8	0.4	0.4	0.1
2015	3.5	0.4	0.4	0.1

*金属(鉄)については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

② 退役量

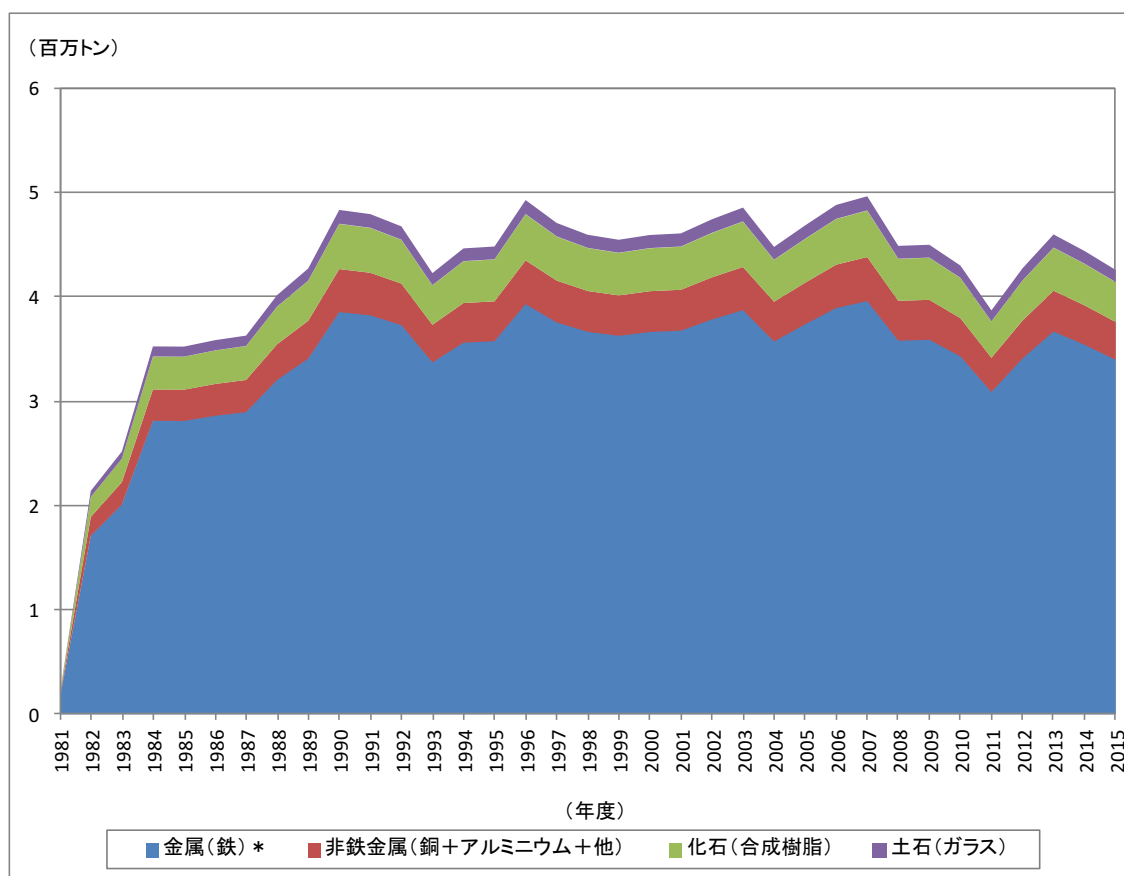


図-11 自動車（乗用車+商用車）の資源別退役量

表-21 主な年の自動車の資源別退役量

(単位：百万トン)

年度	金属（鉄）*	非鉄金属（銅+アルミニウム+他）	化石（合成樹脂）	土石（ガラス）
1990	3.9	0.4	0.4	0.1
1995	3.6	0.4	0.4	0.1
2000	3.7	0.4	0.4	0.1
2005	3.7	0.4	0.4	0.1
2010	3.4	0.4	0.4	0.1
2014	3.5	0.4	0.4	0.1
2015	3.4	0.4	0.4	0.1

*金属（鉄）については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

③ストック量

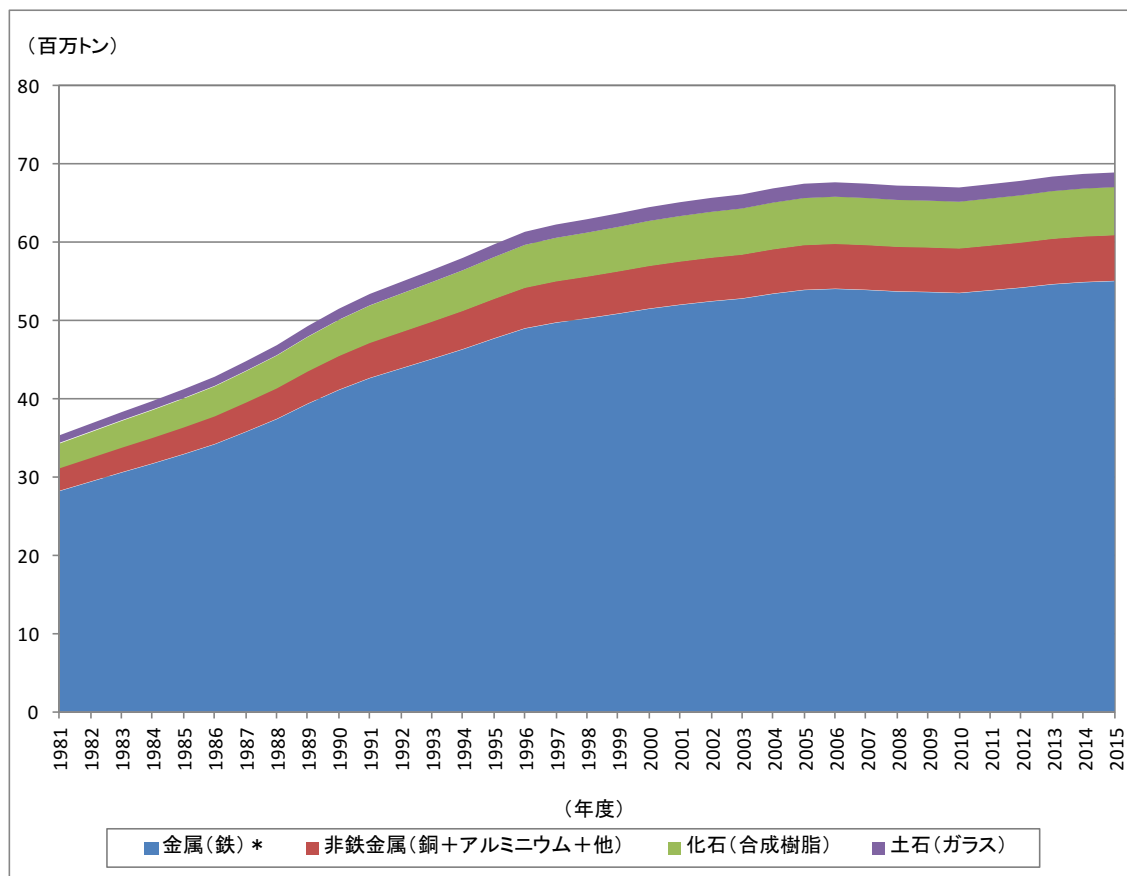


図-12 自動車（乗用車+商用車）の資源別ストック量

表-22 主な年の自動車の資源別ストック量

(単位：百万トン)

年度	金属(鉄)*	非鉄金属(銅+アルミニウム+他)	化石(合成樹脂)	土石(ガラス)
1990	41.1	4.4	4.6	1.4
1995	47.7	5.1	5.4	1.6
2000	51.5	5.5	5.8	1.8
2005	53.9	5.8	6.1	1.8
2010	53.5	5.7	6.0	1.8
2014	54.9	5.9	6.2	1.9
2015	55.0	5.9	6.2	1.9

*金属(鉄)については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

家電

①投入量

【エアコン】

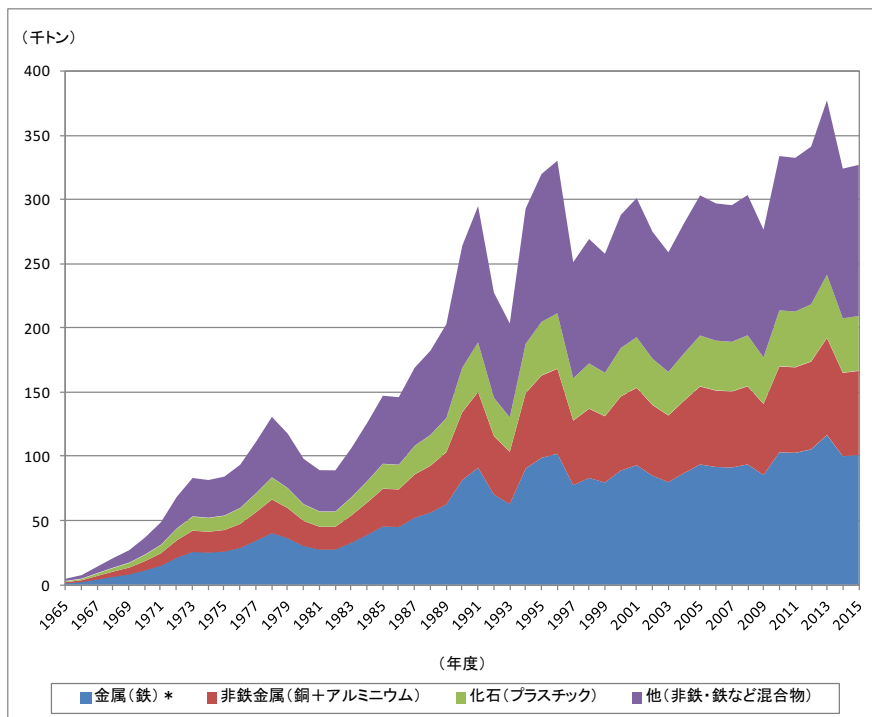


図-13 エアコンの資源別投入量

【冷蔵庫】

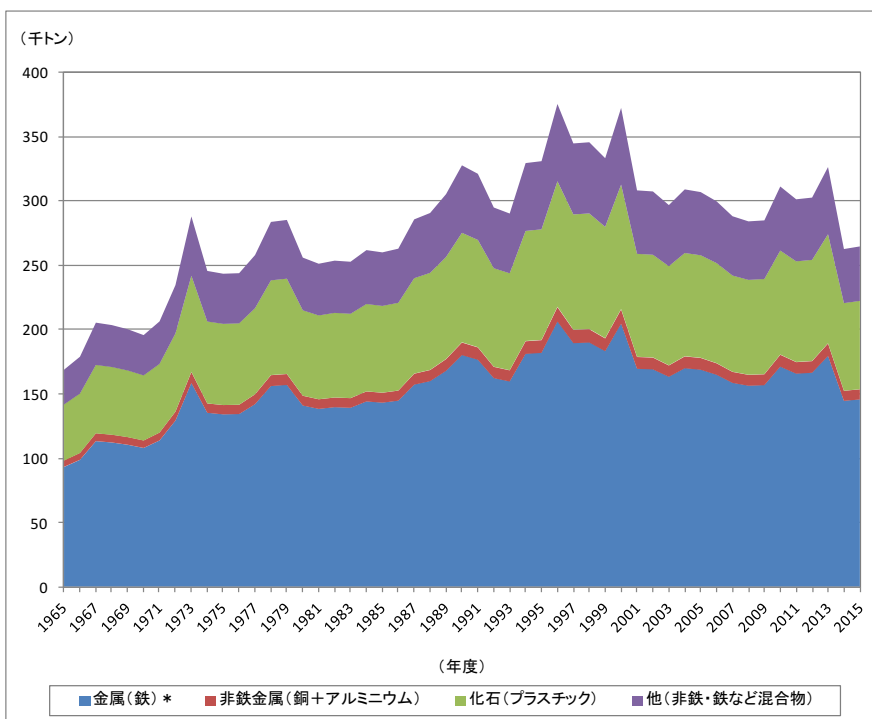


図-14 冷蔵庫の資源別投入量

【洗濯機】

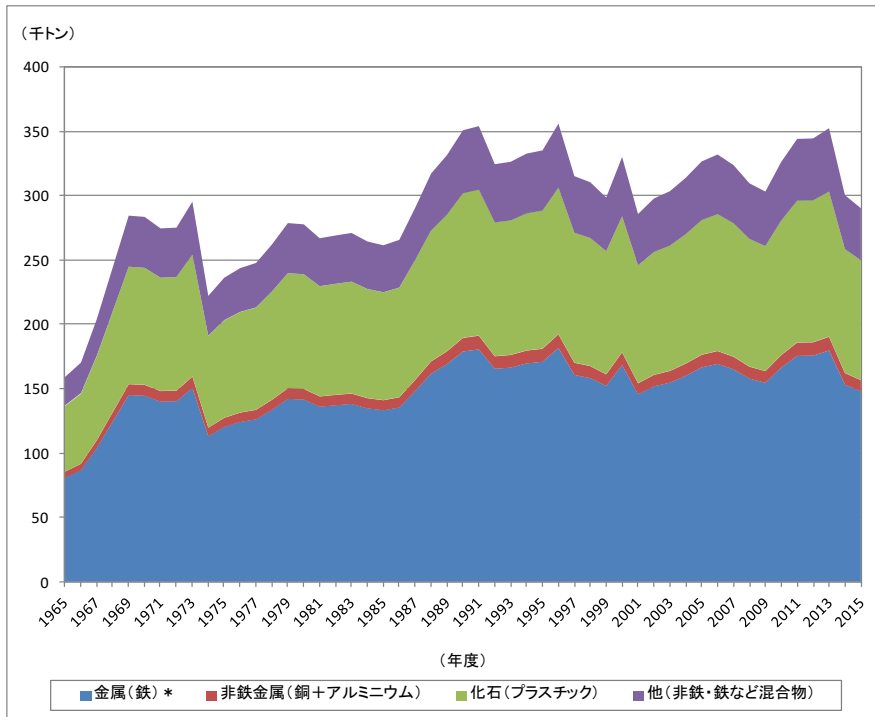


図-15 洗濯機の資源別投入量

【携帯電話】

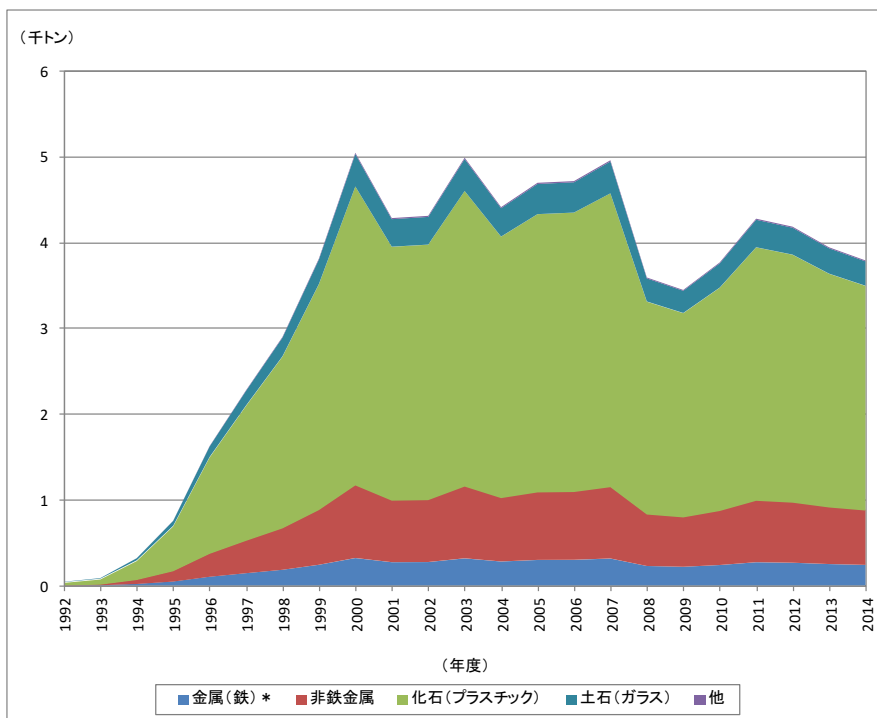


図-16 携帯電話の資源別投入量

【家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）合計】

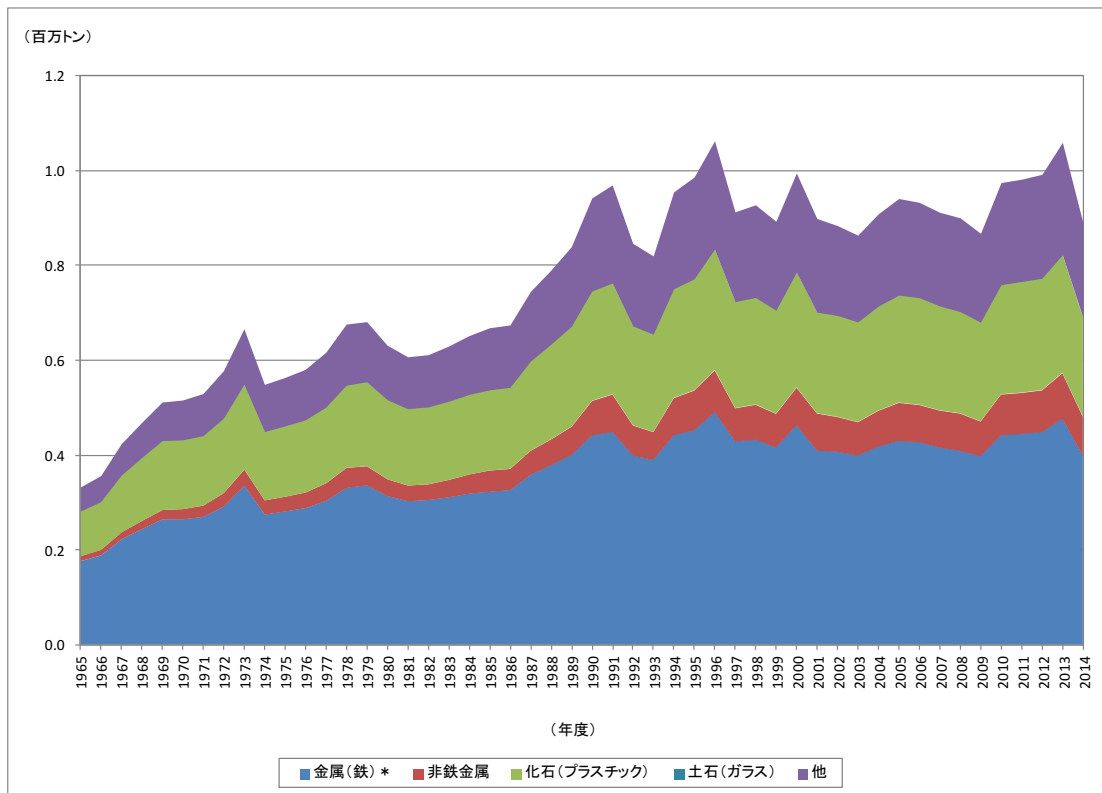


図-17 家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）の資源別投入量

表-23 主な年の家電の資源別投入量

(単位：百万トン)

年度	金属(鉄) *	非鉄金属	化石 (プラスチック)	土石 (ガラス)	他
1990	0.44	0.07	0.23	—	0.20
1995	0.45	0.08	0.24	0.0001	0.21
2000	0.46	0.08	0.24	0.0004	0.21
2005	0.43	0.08	0.23	0.0004	0.20
2010	0.44	0.09	0.23	0.0003	0.22
2014	0.40	0.08	0.21	0.0003	0.20

*金属(鉄)については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

*その他は、そのほとんどが非鉄金属と鉄の混合物となる。

*土石は携帯電話からのもののみ。携帯電話は1992年度以降のみのデータとなる。

*2015年度は携帯電話の投入量がないため2014年度が現時点での最新値。

② 退役量

【エアコン】

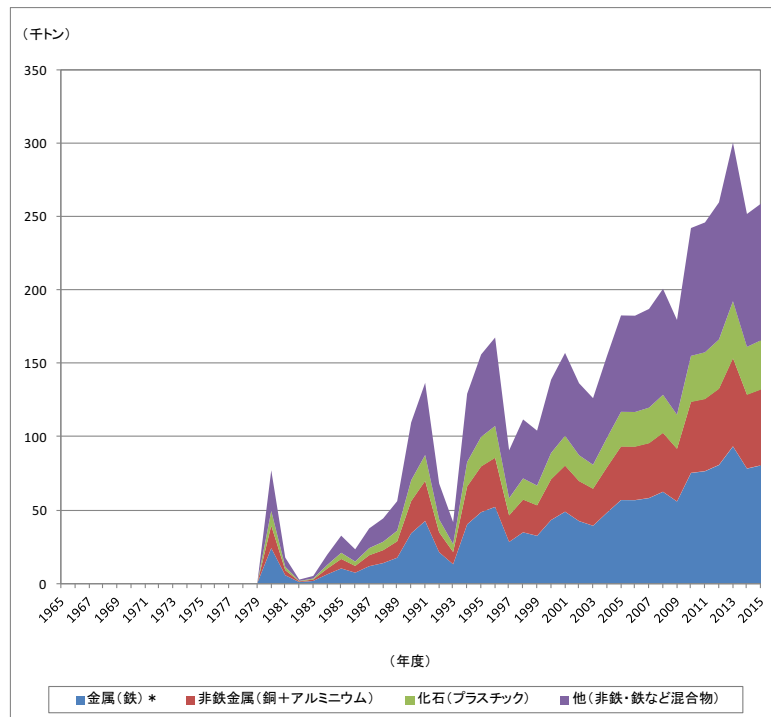


図-18 エアコンの資源別退役量

【冷蔵庫】

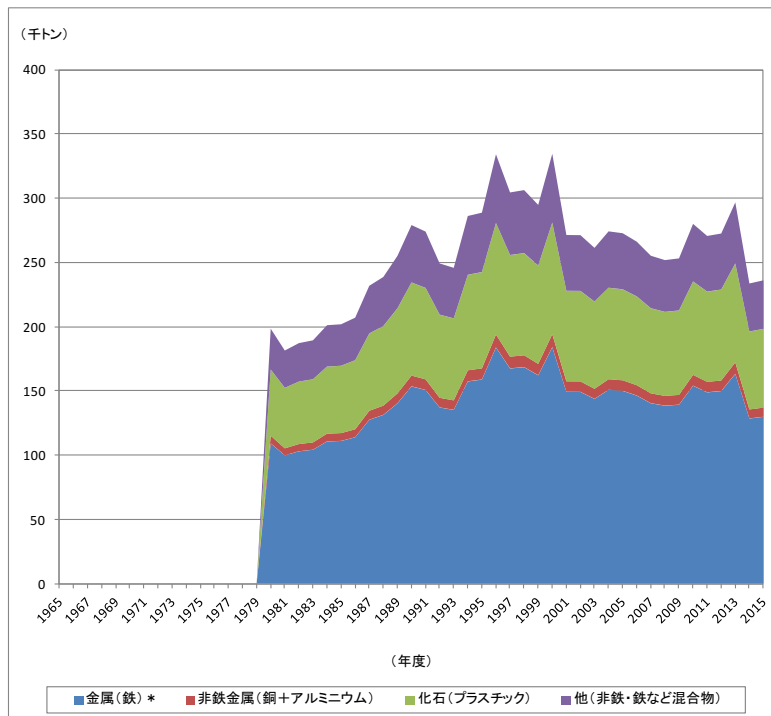


図-19 冷蔵庫の資源別退役量

【洗濯機】

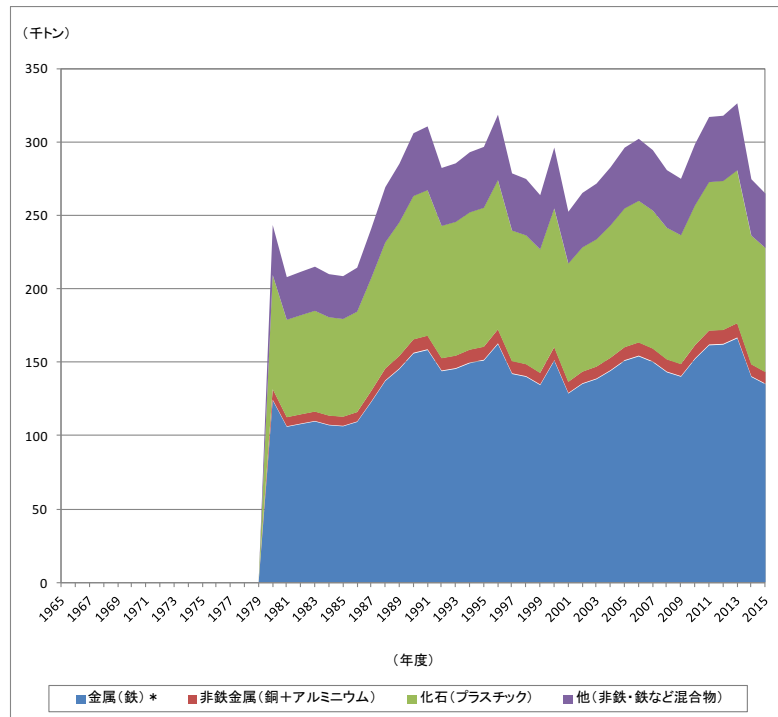


図-20 洗濯機の資源別退役量

【携帯電話】

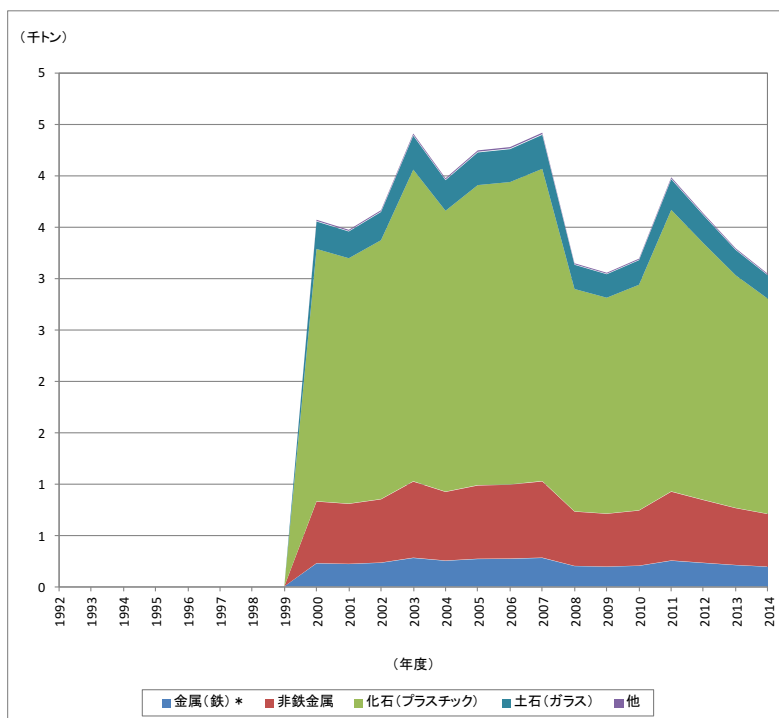


図-21 携帯電話の資源別退役量

【家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）合計】

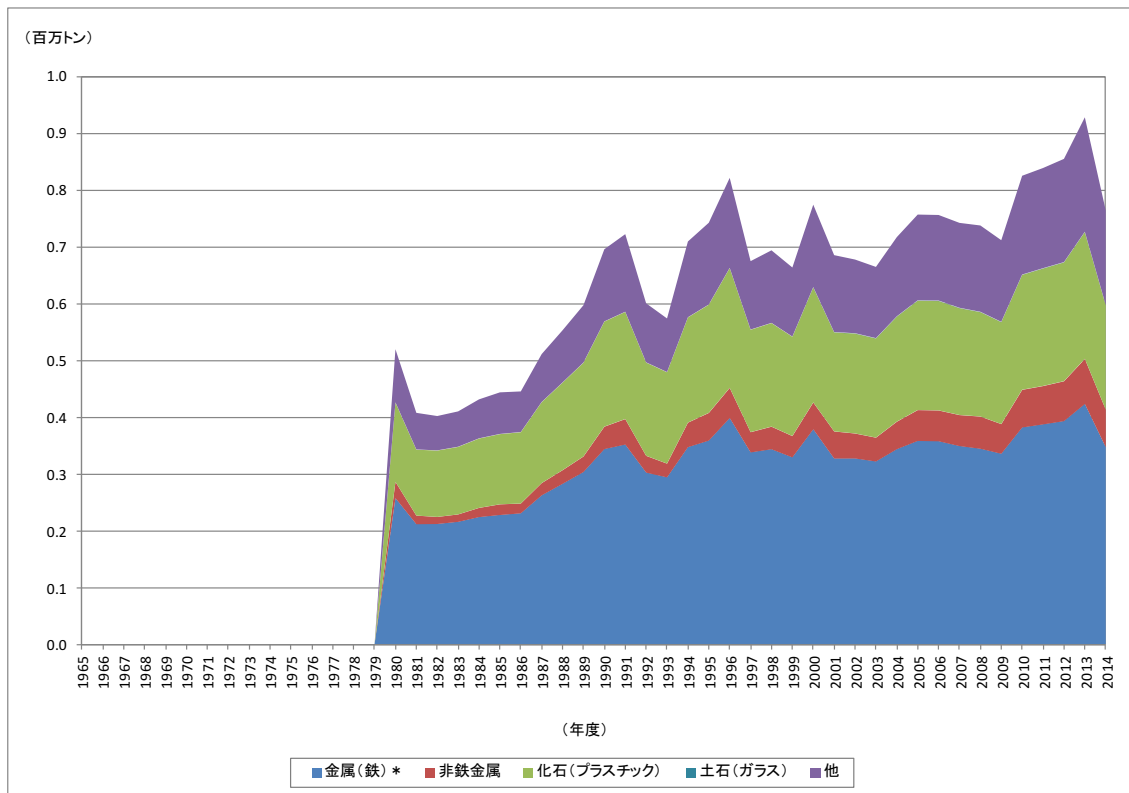


図-22 家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）の資源別退役量

表-24 主な年の家電の資源別退役量

(単位：百万トン)

年度	金属(鉄) *	非鉄金属	化石 (プラスチック)	土石 (ガラス)	他
1990	0.34	0.04	0.18	—	0.13
1995	0.36	0.05	0.19	0.0000	0.14
2000	0.38	0.05	0.20	0.0003	0.15
2005	0.36	0.05	0.19	0.0003	0.15
2010	0.38	0.07	0.20	0.0002	0.17
2014	0.35	0.07	0.18	0.0002	0.17

*金属（鉄）については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

*その他は、そのほとんどが非鉄金属と鉄の混合物となる。

*土石は携帯電話からのもののみ。携帯電話は1992年度以降のみのデータとなる。

*2015年度は携帯電話の投入量がないため2014年度が現時点での最新値。

③ストック量
【エアコン】

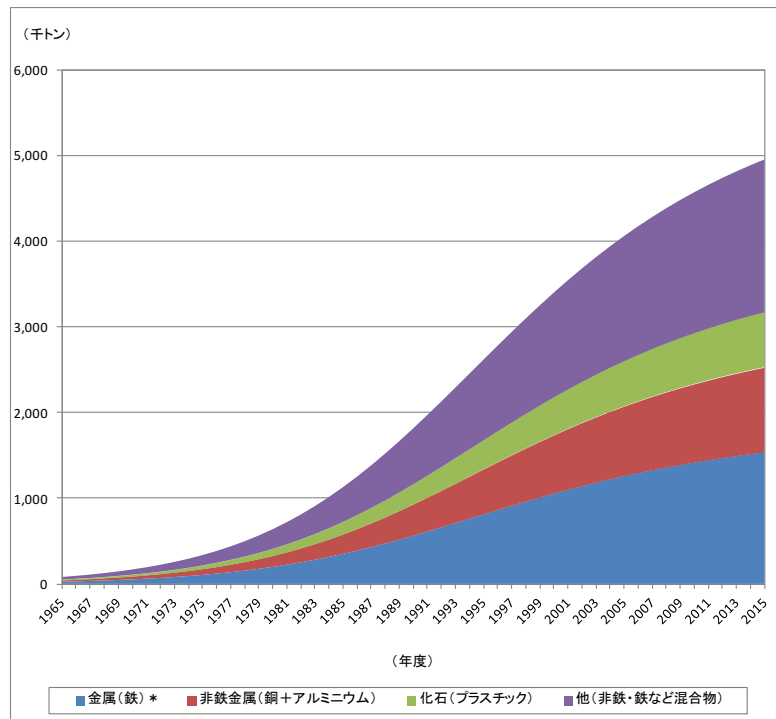


図-23 エアコンの資源別ストック量

【冷蔵庫】

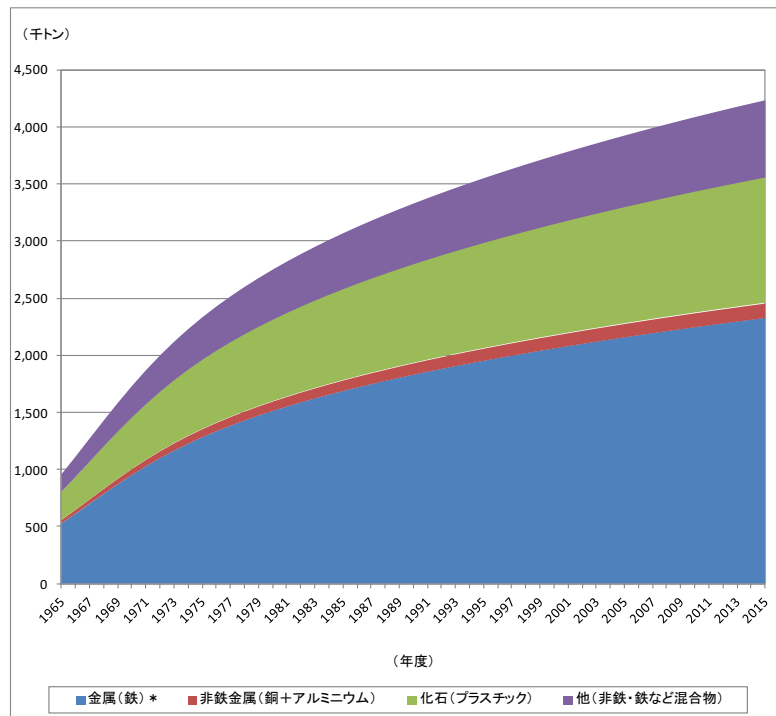


図-24 冷蔵庫の資源別ストック量

【洗濯機】

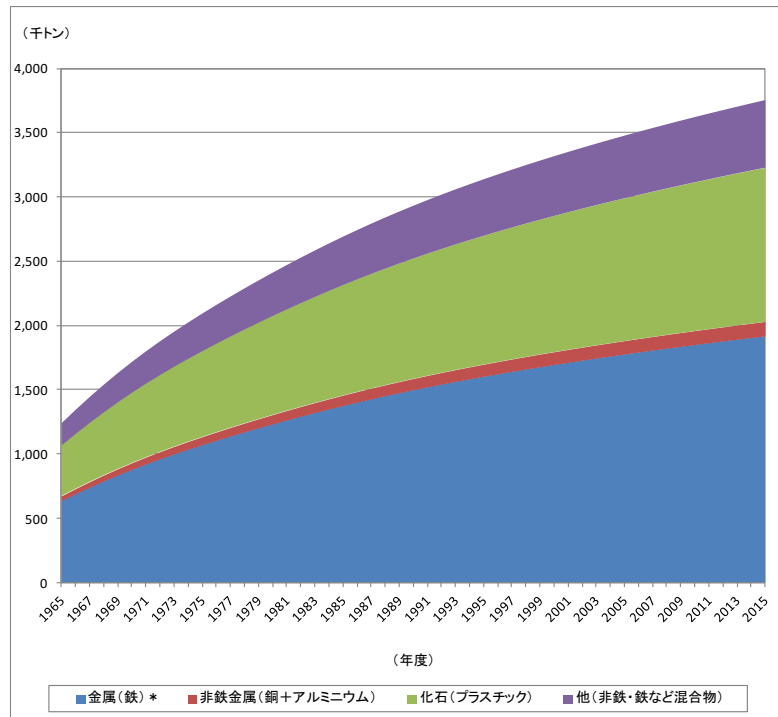


図-25 洗濯機の資源別ストック量

【携帯電話】

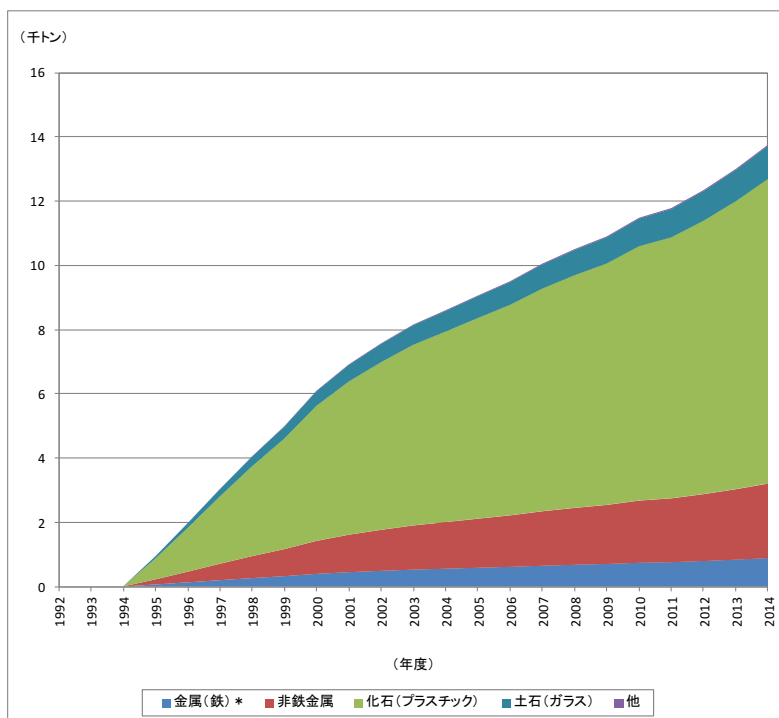


図-26 携帯電話の資源別ストック量

【家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）合計】

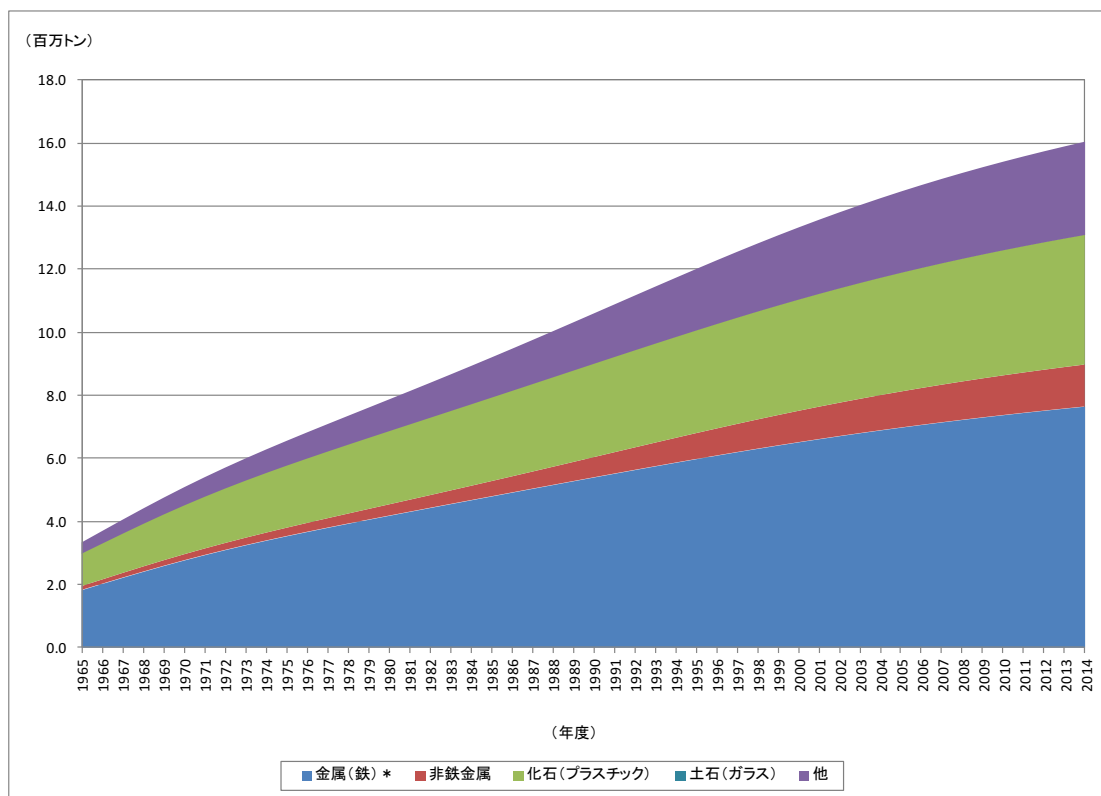


図-27 家電（エアコン、冷蔵庫、洗濯機、携帯電話）の資源別ストック量

表-25 主な年の家電の資源別ストック量

(単位：百万トン)

年度	金属(鉄) *	非鉄金属	化石 (プラスチック)	土石 (ガラス)	他
1990	5.38	0.64	2.98	—	1.60
1995	5.97	0.82	3.27	0.0001	1.95
2000	6.50	0.99	3.54	0.0005	2.29
2005	6.97	1.14	3.78	0.0007	2.58
2010	7.36	1.26	3.98	0.0009	2.81
2014	7.63	1.33	4.12	0.0010	2.96

*金属（鉄）については重複排除のため合計値としては用いないが、参考として推計しているもの。

*その他は、そのほとんどが非鉄金属と鉄の混合物となる。

*土石は携帯電話からのもののみ。携帯電話は1992年度以降のみのデータとなる。

*2015年度は携帯電話の投入量がないため2014年度が現時点での最新値。

電池・照明等

電球については前述のように課題があることからストック量推計には用いていないが、投入量及び退役量については参考として以下に結果を記載する。

①投入量

【電球（参考）】

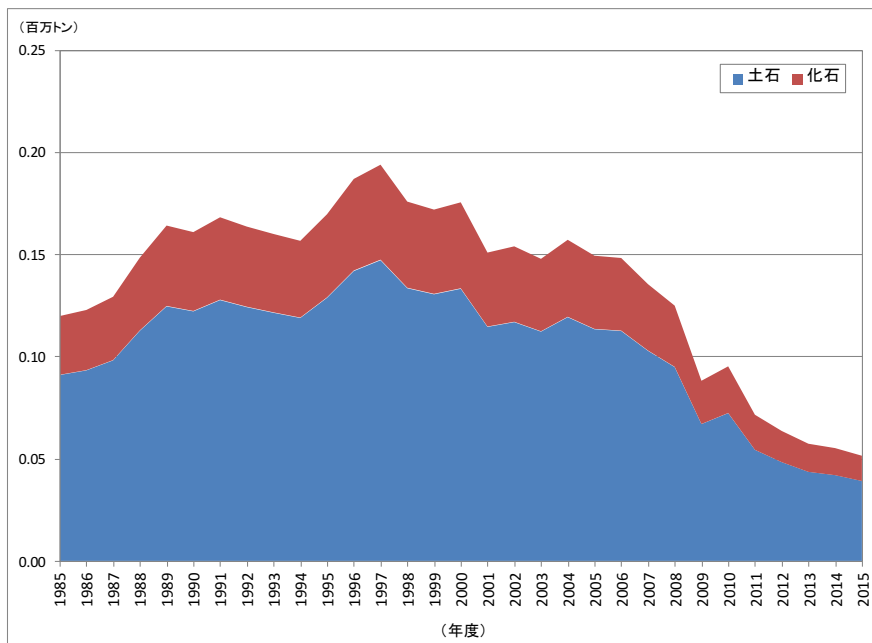
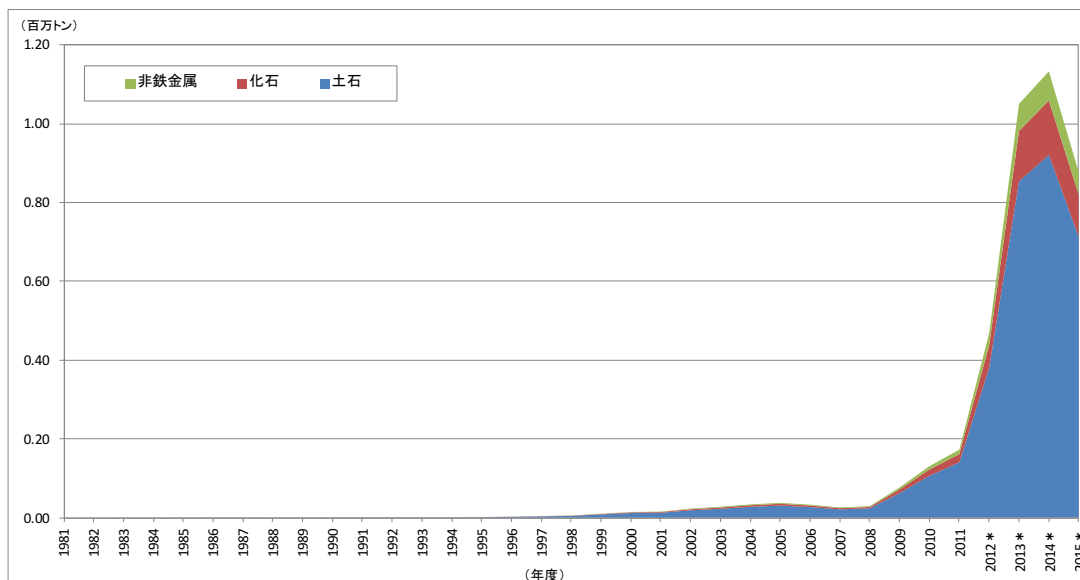


図-28 電球の資源別投入量

【太陽電池モジュール】



*2012年度～2015年度は太陽電池モジュールのみの値。2011年度以前はセルも含む値。

図-29 太陽電池モジュールの資源別投入量

②退役量

【電球（参考）】

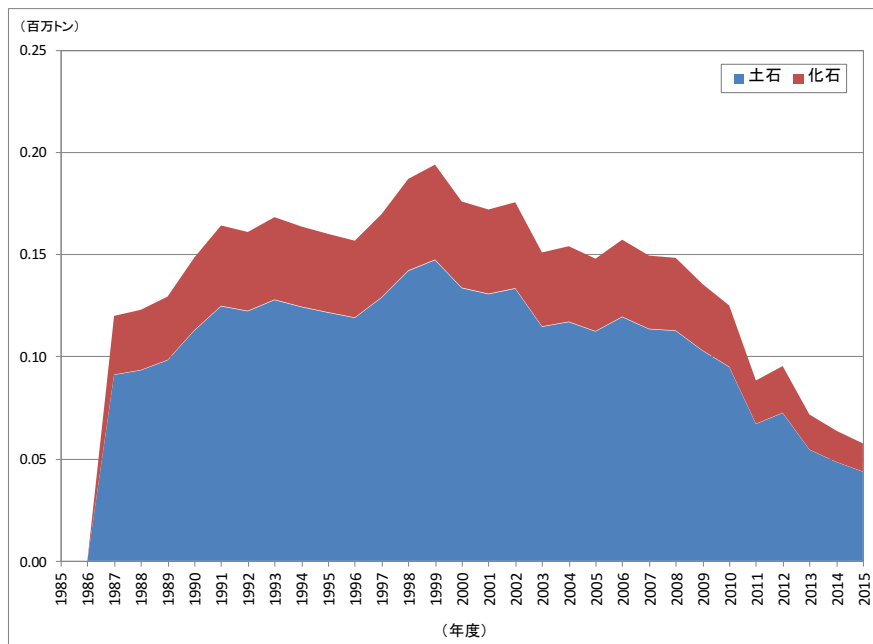


図-30 電球の資源別退役量

【太陽電池モジュール】

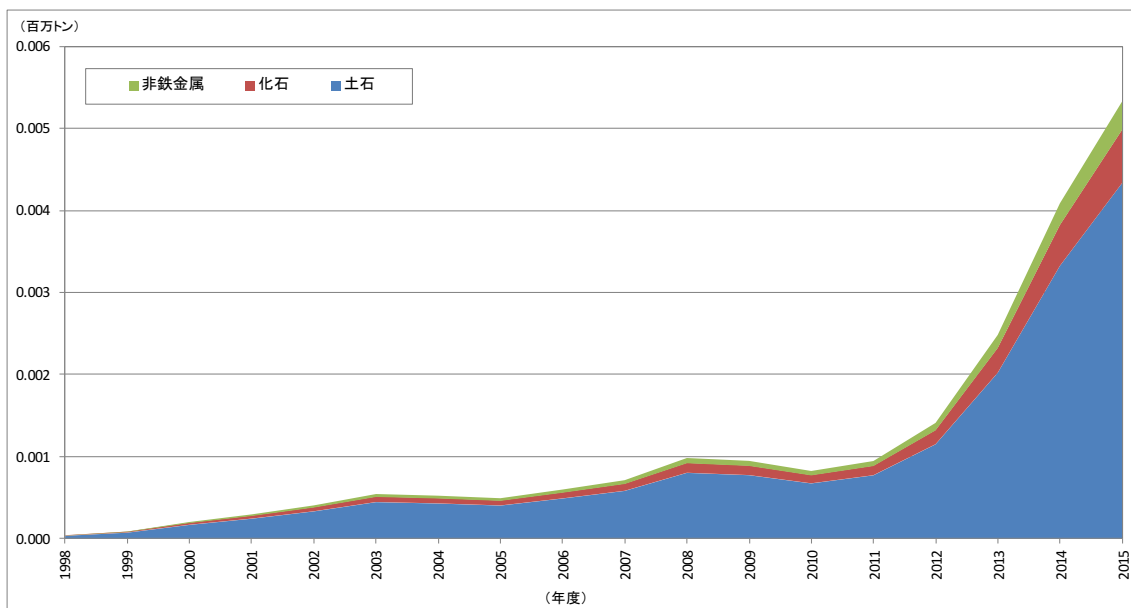
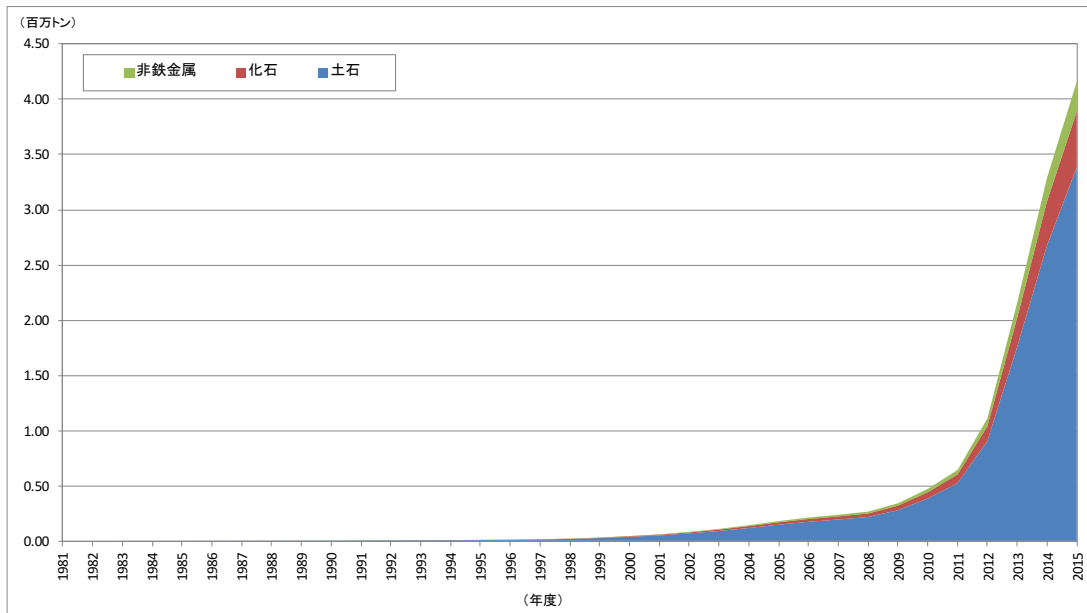


図-31 太陽電池モジュールの資源別退役量

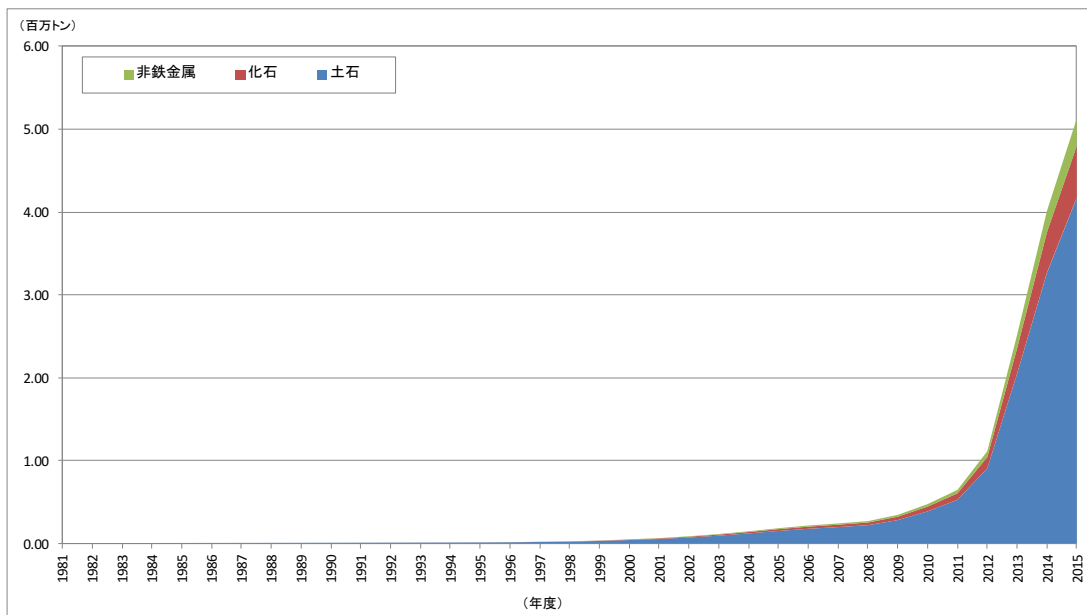
③ストック量

【太陽電池モジュール】



* 2012 年度～2015 年度は太陽電池モジュールのみの値、2011 年度以前はセルも含む値で推計したもの。

図-32 太陽電池モジュールの資源別ストック量－1



* 全て太陽電池モジュール及びセルの値。2013 年度～2015 年度は重複があり実際よりも過大となっている。

図-33 太陽電池モジュールの資源別ストック量－2 (参考)

表-26 主な年の太陽電池モジュールの資源別ストック量

(単位：百万トン)

年度	非鉄金属	土石	化石
1990	0.0003	0.003	0.0005
1995	0.001	0.007	0.001
2000	0.003	0.04	0.01
2005	0.01	0.15	0.02
2010	0.03	0.38	0.06
2014	0.21 (0.26)	2.67 (3.26)	0.40 (0.49)
2015	0.27 (0.33)	3.38 (4.17)	0.51 (0.63)

*2012年度～2015年度は太陽電池モジュールのみの値、2011年度以前はセルも含む値で推計したもの。

*2014年、2015年度の下段（）内の数字は、全て太陽電池モジュール及びセルだが、2013年度～2015年度は重複があり実際よりも過大となっているため参考値。

電線

① 投入量

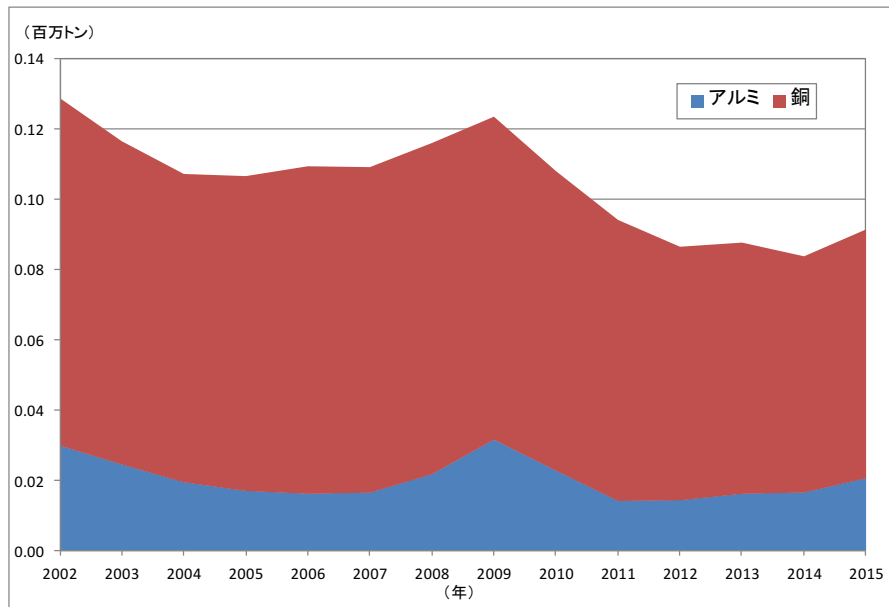


図-34 電線（銅電線+アルミ電線）の投入量

② 退役量

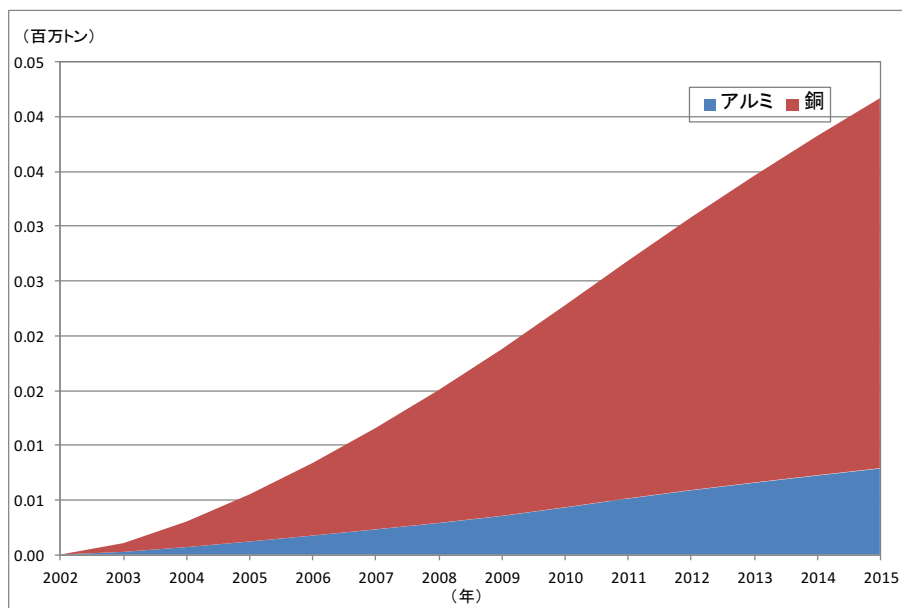


図-35 電線（銅電線+アルミ電線）の退役量

③ストック量

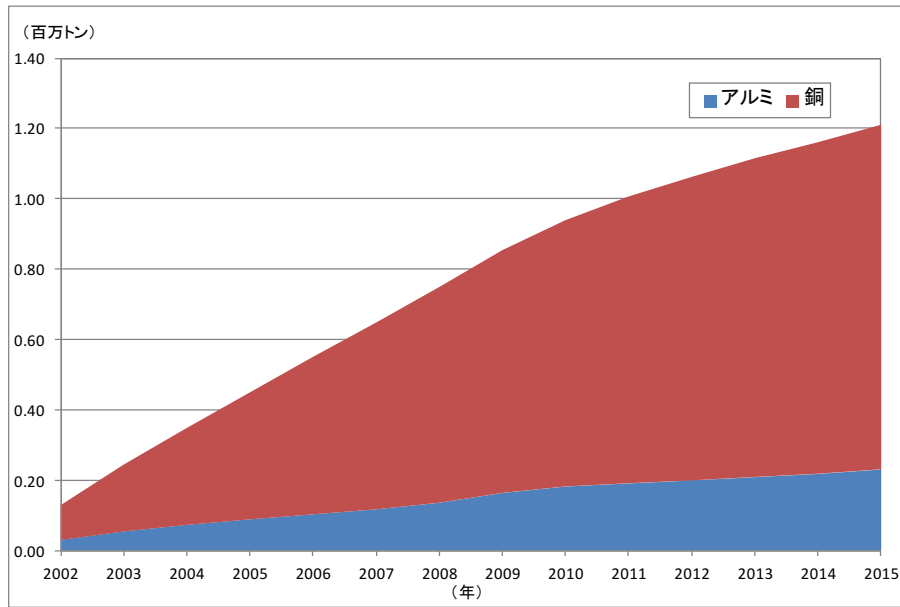


図-36 電線（銅電線+アルミ電線）のストック量

建築物（住宅除く）

生産による統計との比較における参考値として本方法での結果を以下にまとめた。

① 投入量【参考値】

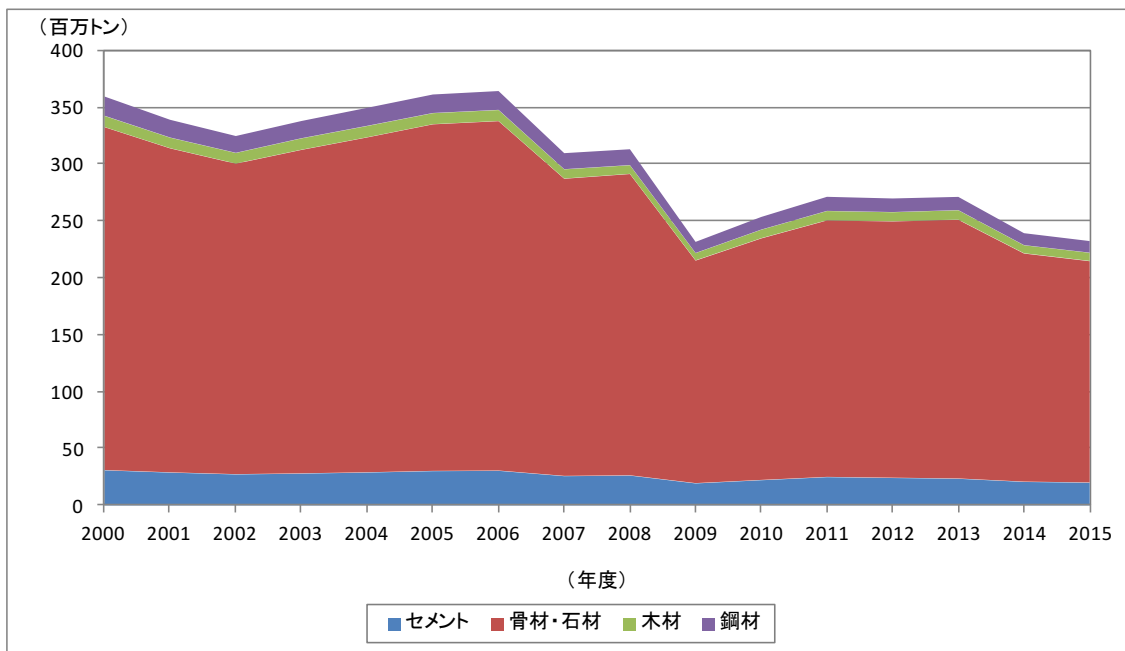


図-37 建築物の資源別投入量

② 退役量【参考値】

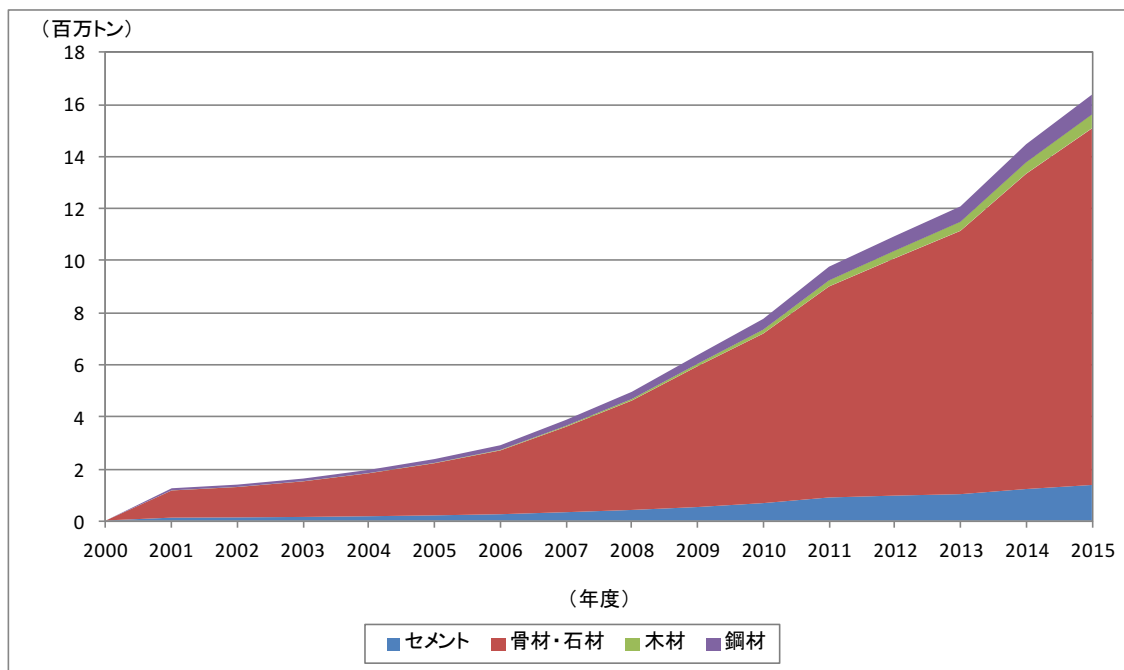


図-38 建築物の資源別退役量

③ストック量【参考値】

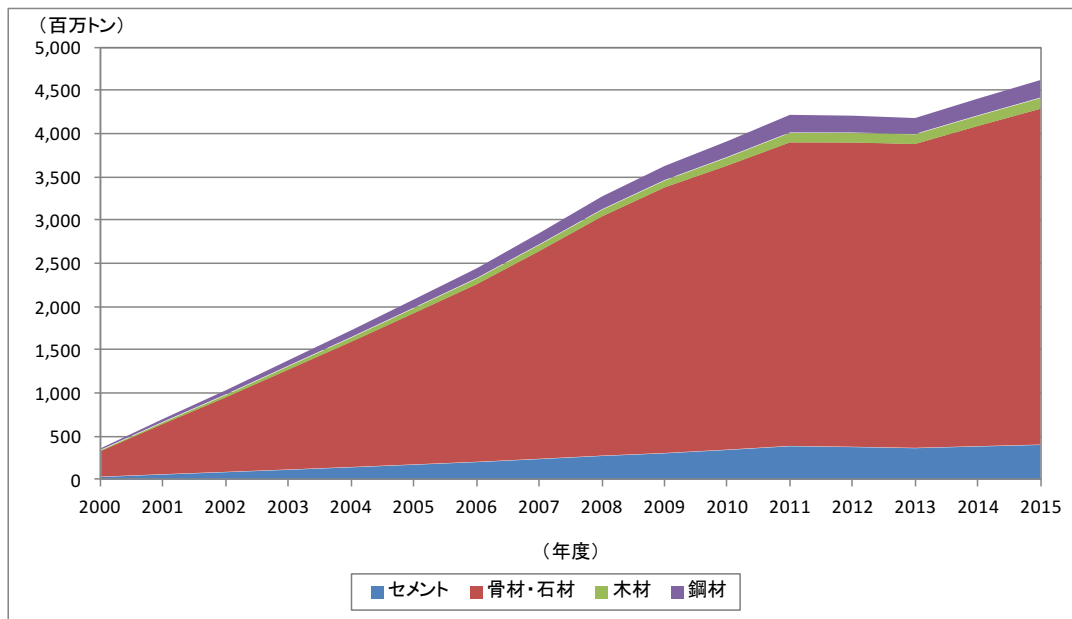


図-39 建築物の資源別ストック量（2000年度開始）

ストック量は初期値が大きく影響し、特に建築物のように寿命が長いものではその影響は大きい。

2000年度開始の結果は推計対象期間が短いため過小評価となっていると考えられる。また、日本全体の生コンクリートの出荷量等とのバランスを考えると、手法的には面積原単位の問題から過大推計となる可能性も考えられる。この点は、初期値の課題と同様に今後統計を利用した積み上げを検討する場合の課題となる。

まとめ（2010年の値）

前述の結果より、2010年の値をまとめると、以下のとおりとなる。

表-40 2010年の物質ストック量等のまとめ

（単位：百万トン）

	投入量（蓄積量）					退役量					排出量					ストック量				
	各種統計及び組成情報・資材原単位等					投入量及び寿命関数から推計					廃棄物等の統計値					ストック関連統計及びGIS情報等				
	土石	化石	木材	金属		土石	化石	木材	金属		土石	化石	木材	金属		土石	化石	木材	金属	
			鉄	非鉄				鉄	非鉄				鉄	非鉄				鉄	非鉄	
建築物	(名古屋大学)	—	(名古屋大学)	7.8	—	(名古屋大学)	—	(名古屋大学)	6.7	—					(名古屋大学)	—	(名古屋大学)	261.5	—	
道路	(名古屋大学)	—	—	0.8	—	(名古屋大学)	—	—	1.1	—					(名古屋大学)	—	—	24.1	—	
他社会基盤	交通インフラ	(名古屋大学)	—	—	0.3	—	(名古屋大学)	—	—	0.5	—				(名古屋大学)	—	—	10.6	—	
	ライフライン	—	—	—	0.1	0.11	—	—	—	0.2	0.02				—	—	—	5.9	0.94	
	その他	(名古屋大学)	—	—	0.8	—	(名古屋大学)	—	—	1.4	—				(名古屋大学)	—	—	42.1	—	
耐久消費財	輸送機器	0.1	0.4	—	15.7	0.4	0.1	0.4	—	13.6	0.4				1.8	6.0	—	257.9	5.7	
	家電	0.0003	0.23	—	0.7	0.09	0.0002	0.20	—	1.2	0.07				0.0009	3.98	—	13.0	1.26	
	電池・照明等	0.11	0.02	—	0.5	0.01	0.001	0.0001	—	0.5	0.0001				0.38	0.06	—	8.2	0.03	
	その他	—	—	—	0.5	—	—	—	—	0.6	—				—	—	—	7.9	—	
その他	—	—	—	17.4	—	—	—	—	26.9	—				—	—	—	345.7	—		
日本全体	(名古屋大学) +0.21 03	0.65	(名古屋大学)	44.4	0.61	(名古屋大学) +0.10 12	0.6001	(名古屋大学)	52.8	0.4901	193.5	14.6	308.6	50.4	(名古屋大学) +2.180 9	10.04	(名古屋大学)	1011.2	7.93	

* 退役量はT年分のCの合計値となるため、2010年のまとめとしては省略。同様に退役純増量も退役量と排出量の差分（日本全国のみ）のため本表では省略。

* 本表は2010年値としているが、統計により「2010年度」値のものもある。

* 参考として建築物の土石等についても試算を行ったが、名古屋大学での推計結果が望ましいため、ここでは載せていない。

* 耐久消費財については、国立環境研究所での推計結果との整合はとれていないが、本推計で行った結果を載せている。

* 金属（鉄）は大分類で計算したときの値。

* 金属（鉄）とその他資源では同じ分類項目でも計算方法が異なるので含まれているものは異なる。

また、人工資本（物質ストック）を対象に、Top-down と Bottom-up にてデータベース整備を行う。Top-down アプローチでは、環境省による日本の物質フローの算定と同様の手法を用いた。貿易統計を主に、各種統計を基に、生産及び廃棄に係る投入量及び排出量を推計し、素材種ごとに集計を行った。物質フローより、投入量と排出量の差を取ることで社会への蓄積純増を算出し、ストックに関わる排出量よりストックからの廃棄量を推計した。また、建設系の物質ストック・フローについて、生産基盤統計と廃棄関連統計より建設資材投入量と建設資材排出量を推計した。主として排出量のデータ制約より、1990 年から 2015 年までを対象として推計を行った。図-2 に投入量と排出量の差分として推計した蓄積純増により推計した結果を示す。なお、物質ストック(1990 年)の初期値については、山下ら(2015)の結果を用いた。図-2 より、1990 年の 172 億トンと比較すると 2015 年では 297 億トンと 1.7 倍に増加したことが示された。これらは都道府県ごとにも算出しており、地域ごとの比較検討も可能である。

Bottom-up アプローチでは、地理情報システム(GIS)を用いて、物質ストックのうち重量的に多くを占める建築物や社会基盤施設の空間情報を整備し、各種構造物に単位あたりの建設資材投入原単位を乗じることで物質ストックを推計した（図-3、図-4）。図-3 は構造物種別の日本全国の物質ストックの推計結果を時系列に整理したものである。1965 年の 73 億トンと比較すると 2010 年では 218 億トンと 3.0 倍ほど増加しており、日本の発展を支えてきた人工資本（物質ストック）の蓄積の状況が示された。また、図-4 は建築物の 2009 年における物質ストックを 500m メッシュで集計した結果である。建築物は人口分布と大きく関係しており、関連する物質ストックも都市部に大きく集積している。このように、物質ストックを地理的に可視化し、時空間における蓄積の動態を明らかにすることで、使用価値と資源化価値の評価に必要なデータベースを構築している。

Top-down アプローチによる推計と Bottom-up アプローチによる推計を比較すると、2010 年で 282 億トンと 218 億トンと、Top-down アプローチによる推計が 1.3 倍という結果となった。

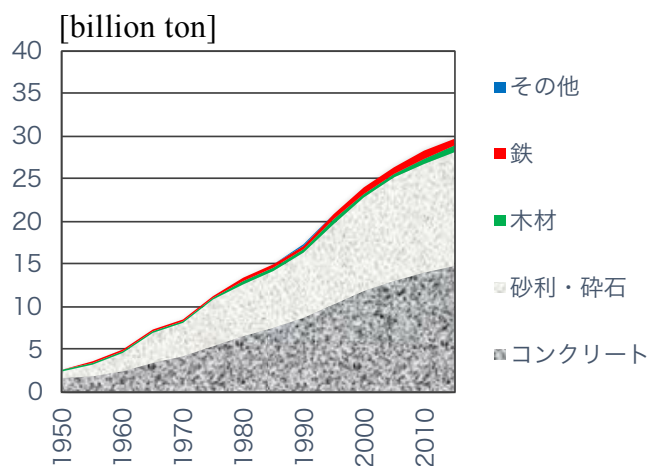


図-41 Top-down による物質ストック量

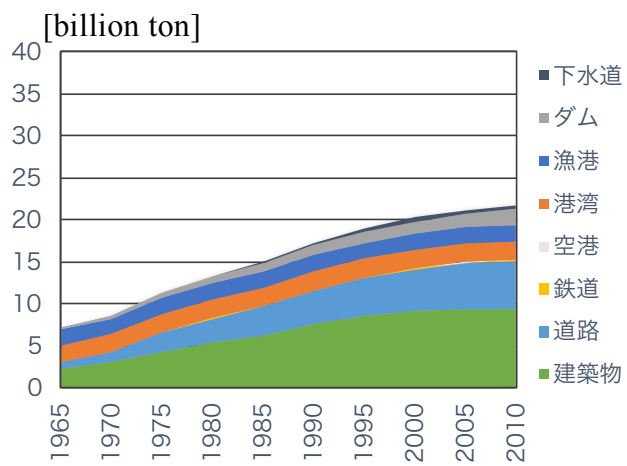


図-42 Bottom-upによる物質ストック量

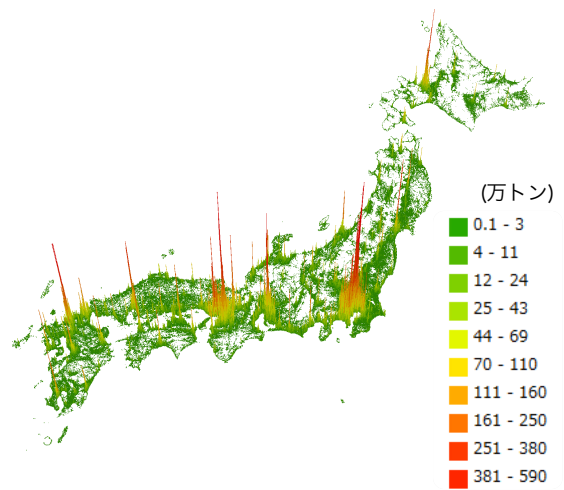


図-43 日本の建築物ストック量分布

(2)-2 建築物ストックの機能量評価

物質ストックの質の向上には、物質ストックを構成する材料の高機能化が1つの鍵であり、材料工学における技術開発の進歩と、高機能材の普及が望まれる。しかし、今まで個別の技術要素における資源ストックの質の向上は表現できない。そこで、材料を評価対象とし、材料機能の向上が反映される指標として、材料の各機能を定量的に評価できる手法が必要と考えられる。とりわけ金属材料の腐食は、日本における年間腐食コストが GNP 比にして約 2%にあたると推計されており[1]、生産活動に大きな影響を与えていることが知られている。また、腐食した材料により引き起こされる事故の中には甚大な人的被害をもたらすこともあり、設計段階から腐食損失及び防食対策について十分考慮する必要があるとされている。本稿では、このような物質ストックを健全に保つための要素技術である耐腐食材料をケーススタディとして評価することとした。

既存の腐食コスト[1]は、経済状況等に影響され変動する貨幣価値による評価のため、材料技術の物理的な性能向上に対する評価に適さない。また、防食機構の性能を表す指標として、腐食速度がある。これは、示強性変数であるため加算性がなく、物質ストックを表現する指標とすることができない。そこで、本研究では、物質ストックの質として、物質ストックを健全に保つための金属材料の防食機能が生み出している価値を定量的に評価する新たな評価手法を構築した。

金属材料の腐食には、全面腐食と、孔食やすき間腐食などの局部腐食の大きく異なる2つの形態があることが知られている。局部腐食は、材料の形状や偶発的な損傷などにより大きく異なるため評価が困難であることから、本研究では、腐食形態のうち全面腐食に対する防食機能を評価の対象とした。また、対象とする材料として、物質ストックの多くを占める構造材料として使用される鉄鋼材を選択した。

鉄鋼材料の全面腐食に対する防食機構には、亜鉛めっき等の防食被膜、ステンレス鋼のような不働態金属としての耐食材料、電気防食の3つが主に挙げられる。評価においては、これらの異なる機構を横断的に評価するための機能を定義する必要がある。防食機能が抑制する反応である腐食反応は、化学平衡論または反応速度論に支配される電気化学反応である[2]。防食は、その機構に依らずそれぞれの因子に基づいているため、2つの因子を考慮することとした。防食機能を、母材である金属材料の腐食を防止するために追加的に与えられると考え、本研究では、防食機能を「母材の腐食反応を回避する機能」と定義した。

次に、定義した防食機能に基づき、評価尺度を設定した。平衡論的見地から、腐食反応が等温等圧条件下で進行する時、その反応の Gibbs エネルギー変化 $|ΔG|$ の電気的な仕事が散逸している。なお、Gibbs エネルギー変化は、外部に取り出すことのできる最大仕事であるため、エクセルギーに対応する。そこで、防食機能により回避された母材の腐食反応によるエクセルギー損失 S_{ene} を防食機能による貢献量とし、Gibbs エネルギーにより評価した。さらに、防食機構自体の反応により散逸したエクセルギー損失を C_{ene} とし、同様に Gibbs エネルギーにより評価することで、防食機能の正味エクセルギー損失回避量 A を式 1 によって表した。

$$A = S_{ene} - C_{ene} \quad \dots(1)$$

構築した評価手法に基づき、前述の3つの防食機構を含む、熔融 Zn めっき、Zn-5%Al 溶融めっき、55%Al-Zn 溶融めっき、Zn-Al-Mg 合金めっき(ZAM)、SUS304、流電陽極方式による電気防食を

対象として評価した。 $S_{ene}(J)$ 、 $C_{ene}(J)$ はそれぞれ、平衡論に基づく Gibbs エネルギー変化と速度論に基づく腐食速度から、式 2、式 3~4 により、示量性の仕事として導出されるものとし、平衡論も速度論を反映した評価手法を構築した。

$$S_{ene} = |\Delta G_b| \cdot \nu_b \cdot 1/M_b \cdot S_b \cdot t \quad \dots(2)$$

$$C_{ene} = |\Delta G_p| \cdot \nu_p \cdot 1/M_p \cdot S_p \cdot t \quad \dots(3)$$

$$C_{ene} = E_e \quad \dots(4)$$

ここで、 ΔG は腐食反応の Gibbs エネルギー変化(J/mol)、 ν は腐食反応の反応速度(g/m²/time)、 M は反応する金属元素のモル質量(g/mol)、 S は表面積(m²)、 E_e は電気防食によって消費された電気エネルギー(J)である。なお、 b 、 p は母材、防食層を表す添え字とした。式 3 は亜鉛めっきおよびステンレス鋼、式 4 は電気防食に適用される。なお、電気エネルギーは、エネルギーとエクセルギーが等価であるため、式 4 とした。

評価に際しては、各種文献の技術情報を参照し、異なる使用環境における腐食速度の違いを考慮して各防食機構の防食面積 1 m² 当たりの年間正味エクセルギー損失回避量を評価した結果を図-44 に示す。溶融 Zn めっきに比べ高耐食性をもつ ZAM の C_{ene} が、溶融 Zn めっきの C_{ene} より大きい値を示すことから、 C_{ene} は、防食機構の高機能化を反映する指標であることが確認された。さらに、同一防食機構において、過酷環境であるほど正味エクセルギー損失回避量 A が大きいことから、防食機構の周囲環境による正味エクセルギー損失回避量の違いを評価できることが確認された。本研究で構築した評価手法ならびに結果である指標が、異なる防食機構を横断的に評価でき、防食技術の向上を評価するのに有効であることが示された。

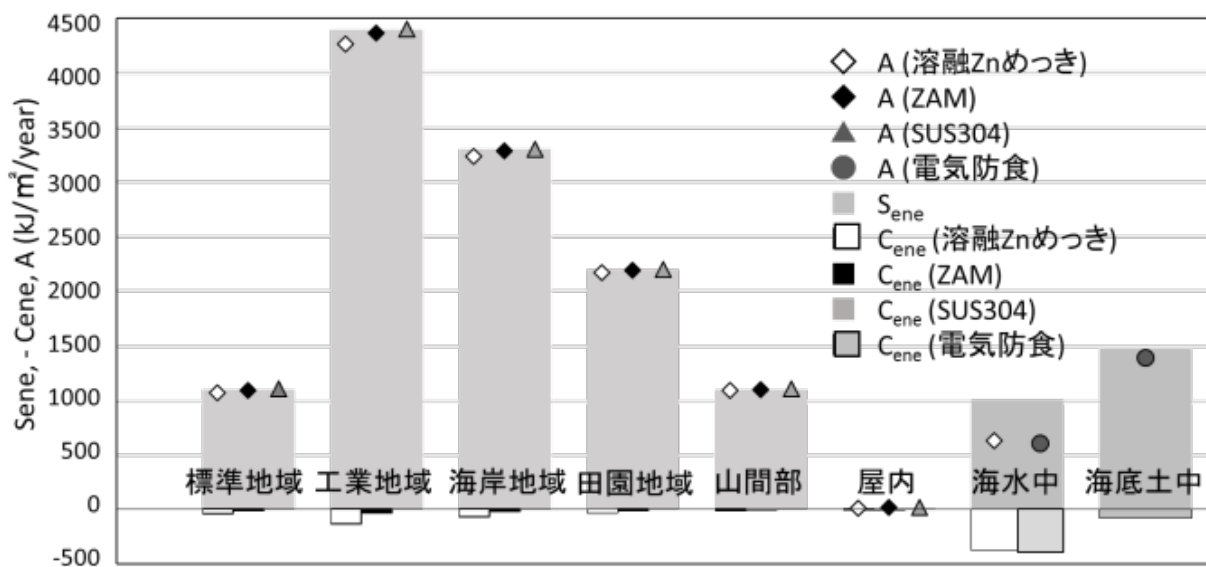


図-44 各防食機構の防食面積 1 m² 当たりの正味エクセルギー損失回避量

本手法を用い、亜鉛めっき鋼材ストック、ステンレス鋼材ストック、電気防食を使用する港湾構造物のストックを時系列で推計し、経年による防食技術の高機能化も技術情報[3]を反映し、日本における鉄鋼材料や構造物の物質ストックの防食機能によって発現されている正味エクセルギー損失回避量

の推移を算出した結果を図-45に示す。防食機能によって発現された正味エクセルギー損失回避量は、過去から単調に増加してきたことが分かった。また、建設部門や自動車部門において多くの機能を発現していることがわかった。これは、より質の高い物質ストックを形成してきたことの証左と云えよう。エクセルギーにより評価できたことにより、相対的に機能量を評価でき、この約50 PJ/yearは、民生家庭部門における電力消費量の約5%にあたる。物質ストックを健全に保つことで、多くのエクセルギー消費を回避しており、防食機能の重要性が確認された。

さらに、その防食機構による内訳から、その増加は、亜鉛めっきおよびステンレス鋼による防食面積の増加によるものと考えられた。年間正味エクセルギー損失回避量の約90%を占める亜鉛めっきについて、亜鉛めっきの防食面積が増加する一方、防食技術の高機能化による亜鉛めっきの目付量の減少により、質量基準での亜鉛の物質ストック量は減少していることが分かった(図-6右軸)。物質ストックの質が単調に増加してきた一方で、それを発現する物質(ここでは亜鉛)の質量は減少しており、材料技術の開発による資源生産性の向上が明確に観測できた。今後は、データ入手性から本研究では反映できなかった亜鉛めっきの種類や使用環境による正味エクセルギー損失回避量の違いを考慮した日本全体での評価が望まれる。

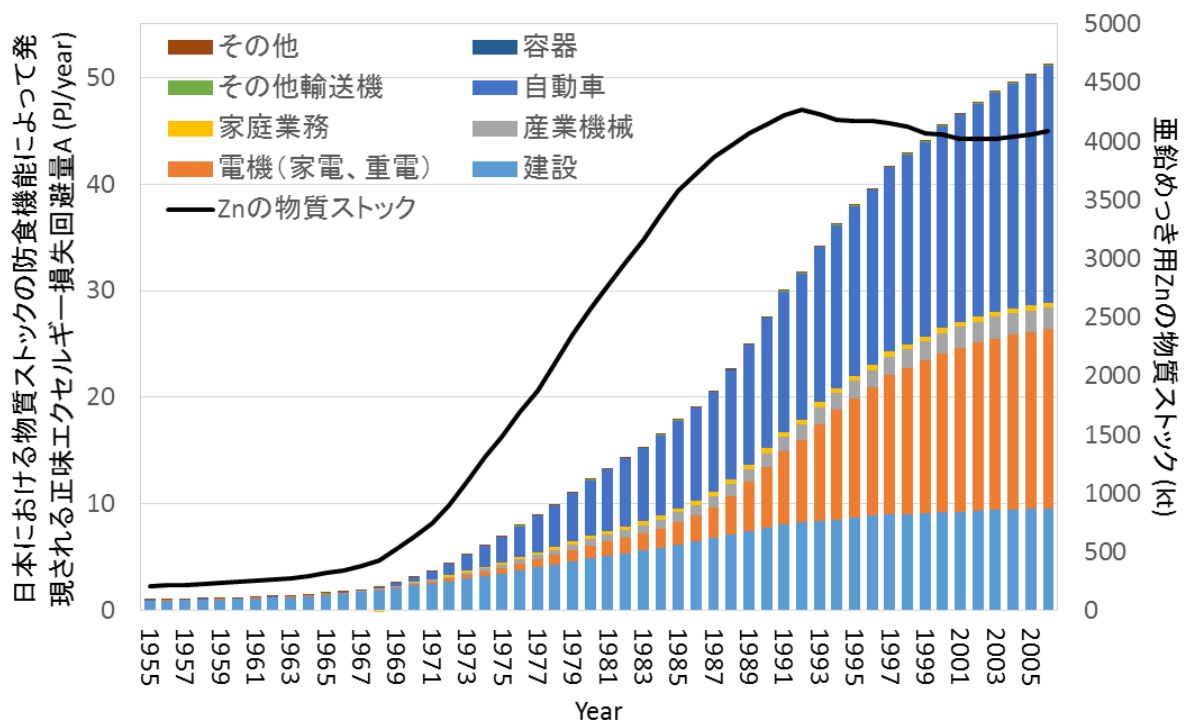


図-45 日本における物質ストックの防食機構による正味エクセルギー損失回避量の推移

(2)-3 耐久消費財のストック量・退役量・排出量の推計アプローチ

物質ストックの推計アプローチについては、橋本らによる環境省廃棄物処理等科学研究費補助金研究（物質ストック勘定体系の構築とその適用による廃棄物・資源管理戦略研究、K1810、K1930、K2031、平成 18～20 年度）において以下の 4 つが整理されている。

- 1) 直接観測
- 2) 蓄積増分法
- 3) 使用年数（寿命）モデル法
- 4) 浸出しモデル法

電気電子機器や乗用車などの耐久消費財については、ストック量に加えて退役量・排出量の把握・推計についてもこれらのアプローチが適用可能である。以下、各アプローチを適用して耐久消費財のストック量、退役量、排出量を把握する際の概要について整理する。

1) 直接観測

製品のストック量（保有量）、退役量、排出量を直接観測することによって把握する。最も典型的な例としては、わが国における自動車の登録検査制度による保有台数および抹消台数の把握がある。この例は、基本的には国内で保有・抹消される自動車は全てカバーされるため、ほぼ完全データと考えることができる（ただし、厳密には、一時抹消されている一部の自動車が抹消台数としてカウントされるため、実態と若干異なっている）。

これに対し、アンケート調査等による標本調査に基づくストック量、退役量、排出量の把握も可能である。例えば、主要な耐久消費財については、消費動向調査（内閣府、毎年）や全国消費実態調査（総務省、5年に1回）の中で世帯あたり保有台数の標本調査が行われている。また、独自にアンケート調査等を実施して、世帯や1人あたりのストック量（標本保有台数）を把握することも可能である。これらのデータに世帯数や人口を乗じることで、わが国における耐久消費財のストック量を拡大推計することが可能である。なお、質問における「保有」の定義次第で退蔵分を分離したデータを得ることができる。

退役量および排出量についてもアンケート調査等による標本調査から拡大推計することができるが、ストック量の調査と異なり回答が回答者の記憶に依存すること、標本の属性等による偏りが拡大推計結果に直接影響することから、信頼性のある値を得ることは容易ではない。一方、期初（＝前期末）と期末のストック量の差分と販売量から退役量または排出量を計算することができる（ストック量の定義に退蔵を含むか否かで退役量と排出量を区別して計算できる）。

2) 蓄積増分法

ストック量（耐久消費財の場合では保有台数）の初期値に対し、各年の投入量（同じく販売台数）と退役量または排出量を差し引きしていくことで、任意の時点におけるストック量を計算する。このアプローチは、投入量と排出量の観測が可能な財について適用可能であるが、耐久消費財の場合には退役量や排出量の直接観測が容易ではないため、あまり有効なアプローチではないと考えられる。より正確に言えば、直接観測や寿命モデルで退役量または排出量の把握・推計が可能であっても（可能ではある）、それらのアプローチでは同時にストック量を直接把握・推計しているため、蓄積増分法を適用する理由はない。

3) 使用年数（寿命）モデル法

設定した製品の使用年数分布と過去の投入量（販売量）から、製品の販売から退役または排出までの時間遅れを考慮してストック量、退役量、排出量を推計する。より具体的には、販売から推計対象時点までの経過年数（使用年数）に対する製品の使用年数分布（残存割合、退役または排出割合（両者は相互に変換可能））の分布を設定し、各年次における販売台数に対応する使用年数の残存割合、退役または排出割合を乗じて総和することで、推計対象時点におけるストック量、退役量、排出量を推計する。使用年数分布は、実データがあればノンパラメトリックな分布を設定可能であるが、耐久消費財についてはワイブル分布関数やガンマ分布関数などの統計分布関数を用いてパラメトリックに設定される事例が多い。

このアプローチは、ストック量、退役量、排出量の直接観測が困難な場合に有効である。一方、過去の販売台数の時系列データが用意できない場合（少なくとも平均使用年数の2倍程度の年数を遡った期間のデータが必要）には適用不可であるが、わが国の場合、電気電子機器や乗用車といった耐久消費財については、業界団体による自主販売統計等で長期の時系列データが整備されていることが多いため、耐久消費財を対象とした場合には有効な方法であると考えられる。

なお、寿命モデルを用いた推計においては製品寿命が分布として与えられることが多いが、ある年次に販売された製品に対して一律の使用年数を設定し、その使用年数を経た後に一斉に排出されると仮定して計算を行う方法も用いられることがある。例えば、ある品目の使用年数を10年とせつした場合には、2000年の排出台数は1990年の販売台数に等しいことになる。この場合、各年次に販売された製品はそれぞれ10年間保有されることから、ある時点におけるストック量は推計対象時点から過去10年間の販売台数の総和として計算される。この方法はより単純であり、必要な販売台数データも設定する使用年数分だけ過去に遡った時系列データがあれば適用可能である。ただし、一律の使用年数を与えることから、使用年数の変化を考慮した推計が困難であること、得られるストック量、退役量、排出量の年式分布が得られないため、物質量への変換の際に含有物質の種類や含有率変化を考慮することができない。

4) 浸出しモデル法

期初のストック量に対して定率の退役率または排出率を設定することで退役量または排出量を推計し、残りに販売量を加算することで期末のストック量を推計する。ストック量のうち一定の割合が退役または排出されるとしているだけで、基本的な考え方は蓄積増分法に類似している。退役量または排出量を別途観測、推計する必要がない分、適用は容易であるが、期初のストック量（少なくともストック量の初期値）を別途把握する必要がある。

(2)-4 耐久消費財の製品使用年数分布の作成方法

製品の使用年数分布（特に平均使用年数）のデータを作成しておけば、それをパラメータとして上記3)の使用年数（寿命）モデル法によって耐久消費財のストック量、退役量、排出量を継続的に推計することが可能である。特に小型家電等については直接観測によるストック量等に関する情報が提供されていないことから、このアプローチは有用である。ここでは、上記3)使用年数（寿命）モデルを適用する際の重要なパラメータである製品寿命データ、特に製品使用年数分布の作成方法について述べる。

耐久消費財の使用年数分布の作成方法については、Oguchi et al. (2010)において文献レビューに基づく体系的な整理がなされている。その整理によれば、使用年数分布の主な作成方法は以下の4つに大別される。

- 1) 退役または排出製品の使用年数データからある期間における排出割合分布を推定する方法
- 2) 保有製品の使用年数データからある時点における残存割合分布を推定する方法
- 3) 保有製品の使用年数データからある期間における残存割合分布を推定する方法
- 4) 販売、保有、退役・排出の台数収支からある時点における残存割合分布を推定する方法

自動車については前述の通り、登録検査制度によってほぼ完全データが提供されるためいずれの方法も適用可能であり、いずれに方法でも同様の使用年数分布が作成される。電気電子機器などの耐久消費財については、1)、2)の方法がよく用いられている。1)の方法では、リサイクルプラント等での調査または消費者へのアンケート調査による退役または排出製品の使用年数（年式）調査に基づいて推定が行われた事例が多い。2)の方法では、消費者に対するアンケート調査による保有製品の使用年数（年式）調査に基づいて推定が行われることが多い。ただし、前者については、リサイクルプラント等における回収製品が国全体の退役または排出製品に対して偏りを持つ可能性があることや、消費者アンケートでは消費者の記憶に基づいて過去の排出製品の情報を得るために情報の確度が劣ると考えられることから、2)の方法の方が推奨される。

また、4)の方法は、製品の使用年数分布と販売台数の時系列データから計算される総保有台数が、統計や調査から別途与えられる総保有台数と一致するように、使用年数分布のパラメータ（実務的には平均値）を最適化する。販売、保有、退役または排出の台数収支を担保していることから、理論的には最も精度のよい使用年数分布を作成することができると考えられる。2)の方法では総保有台数データも同時に作成可能であることから、例えば2)の方法で得られた使用年数分布を初期値として、4)の方法で台数収支を満たすように使用年数分布の最適化を行うことも考えられる。

次年度において、上記の方法を用いて小型家電等について使用年数分布の作成を行い、そのストック量、退役量、排出量を推計することとする。

(3) 蓄積された物質ストックの状況の把握

物質ストックは社会に蓄積された人工資本で使われた物質の総計であり、毎年の蓄積純増の累計である。蓄積純増は、物質フロー算定の結果として算出されており、ストックからの廃棄物がしめる廃棄物の発生の割合は高いことから、物質ストックと物質フローは相互に深い関係にある。物質フローについては、環境省・環境白書により物質フロー図として公表されているが、ストックとの関連を示した図は報告されていない。本研究課題では、物質ストックの状況の把握を目的として、既存の物質フロー図を拡張し、「物質ストック・フロー図」を作成した。図-46のように物質ストックはフローを支えるようなイメージで図示しており、蓄積純増や廃棄物の発生と関わっている様子を表している。さらに物質ストックの内訳として、製品別と素材別の物質量を記述することで国全体の様子を分かりやすく示している。(2)により定量化された値を整理し、日本の物質ストック・フロー図を作成した(図-47)。1990年と2010年を比較すると、総物質投入量が約24億トンから約16億トンと6割程度に減少しており、循環利用量は1億7500万トンから2億4600万トンと増加している。その一方で、物質ストックは約172億トンから282億トンと増加しているが、年々ストック増加のスピードは低減しており、ストック量は飽和の傾向にあるとも読み取れる。蓄積された物質ストックが物質フローを支えており、資源効率が拡大していることが示唆される。

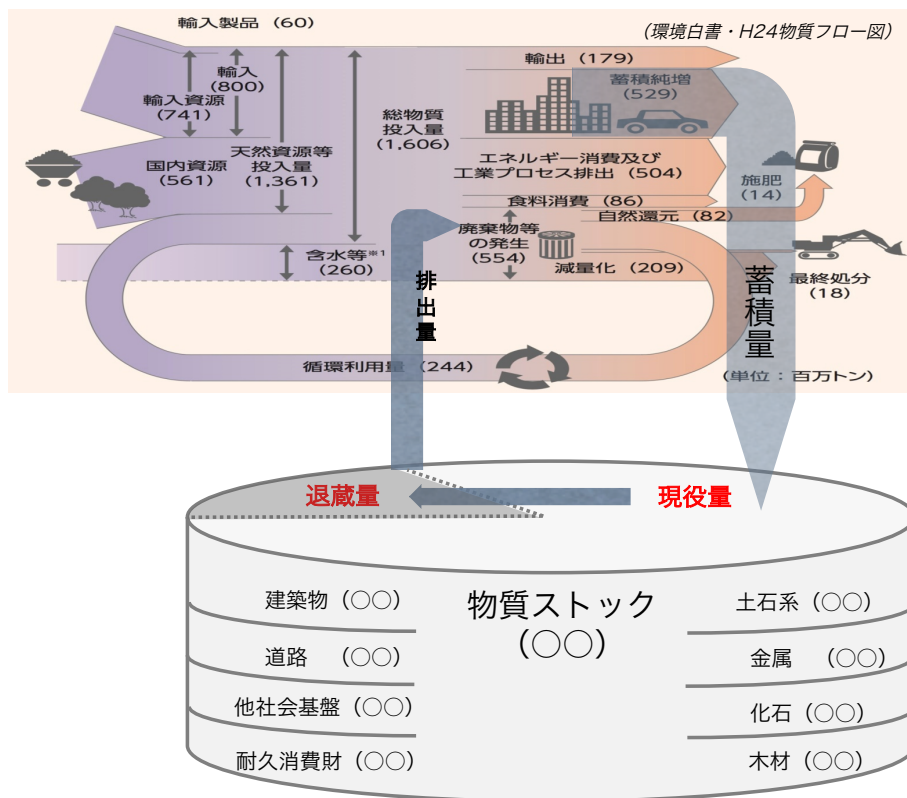
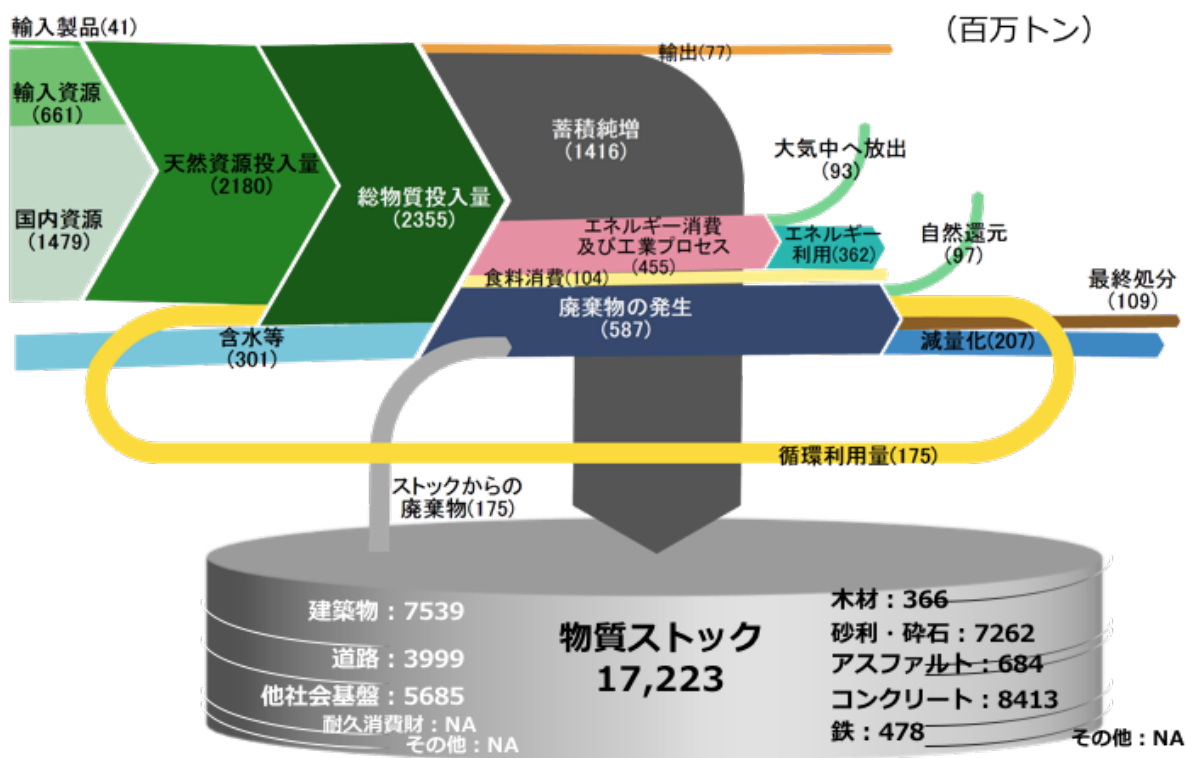
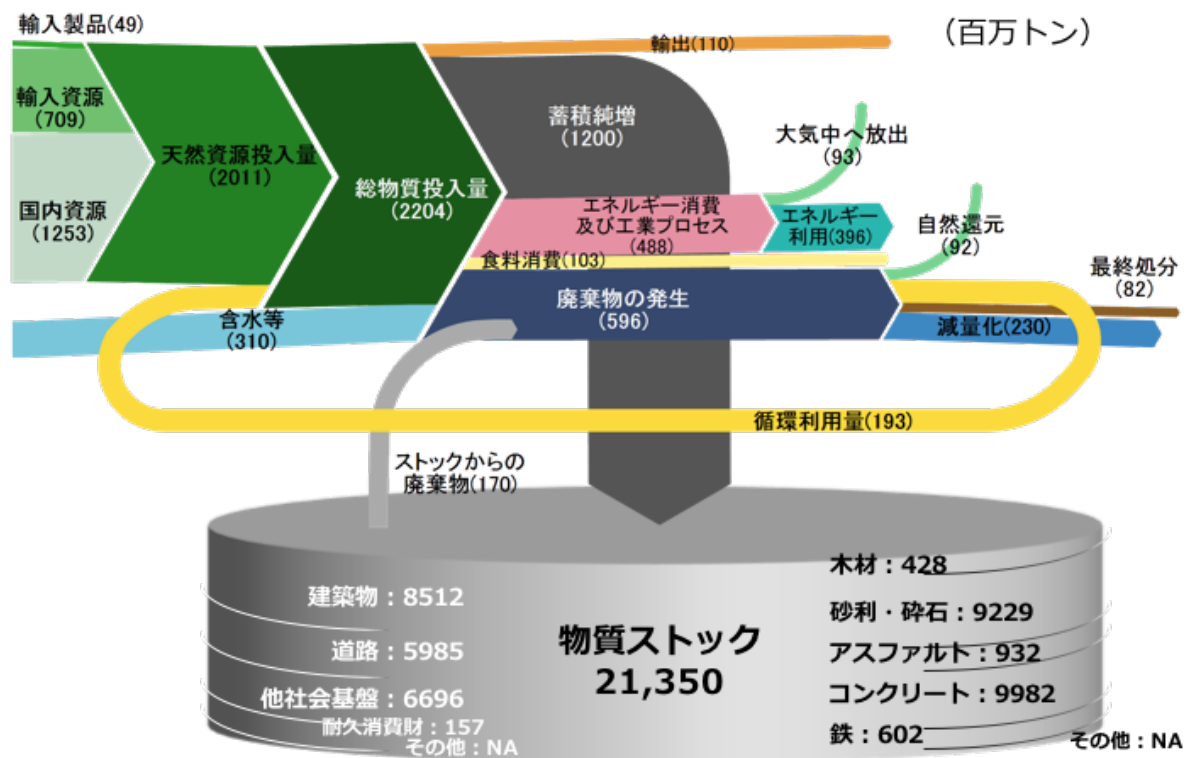


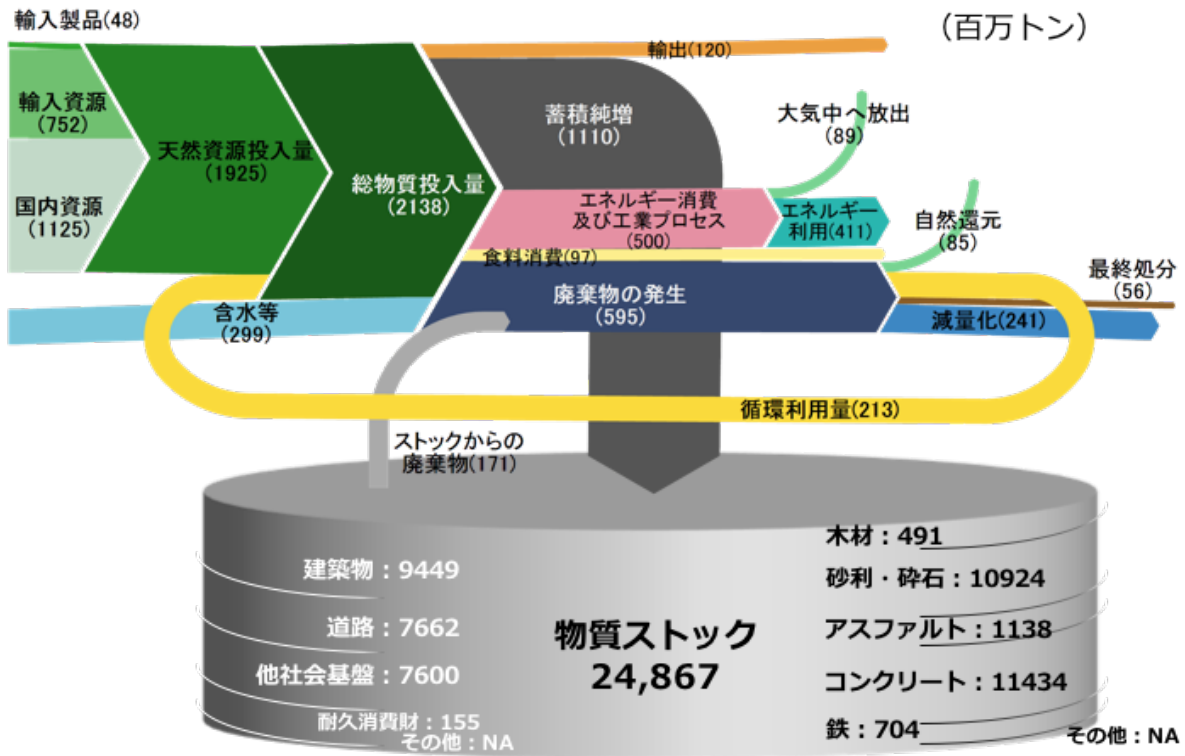
図-46 「物質ストック・フロー図」の概念



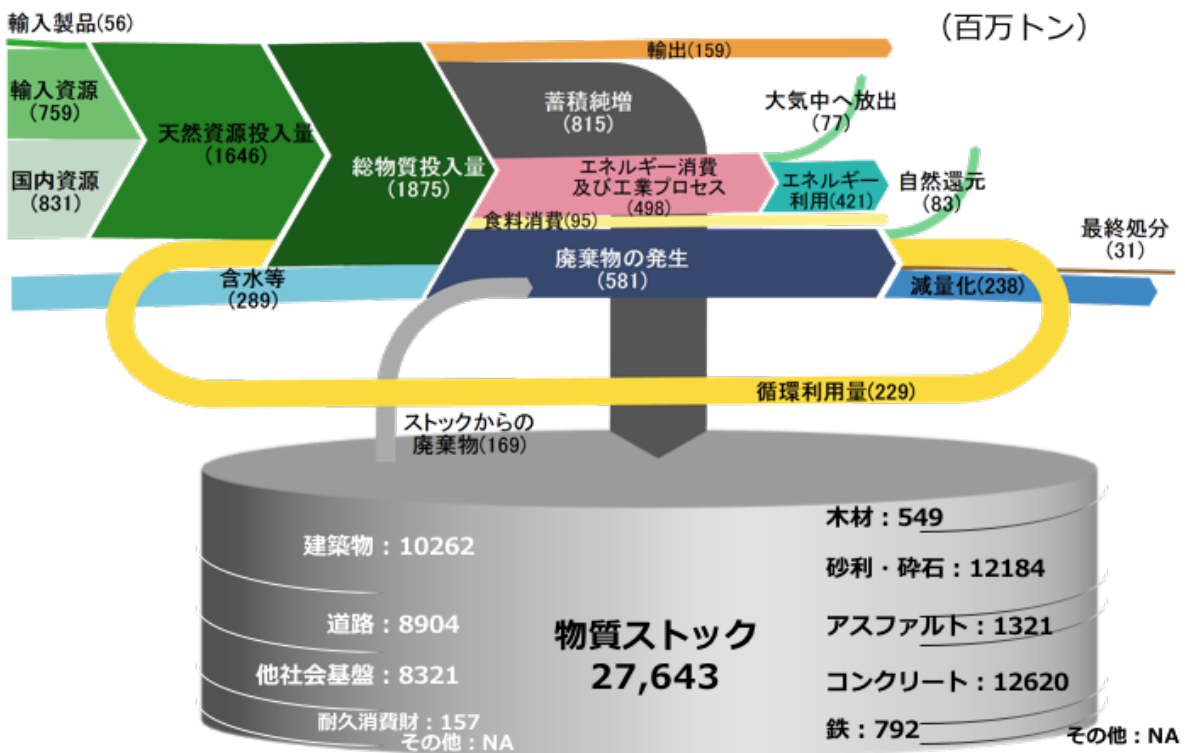
(a) 1990年



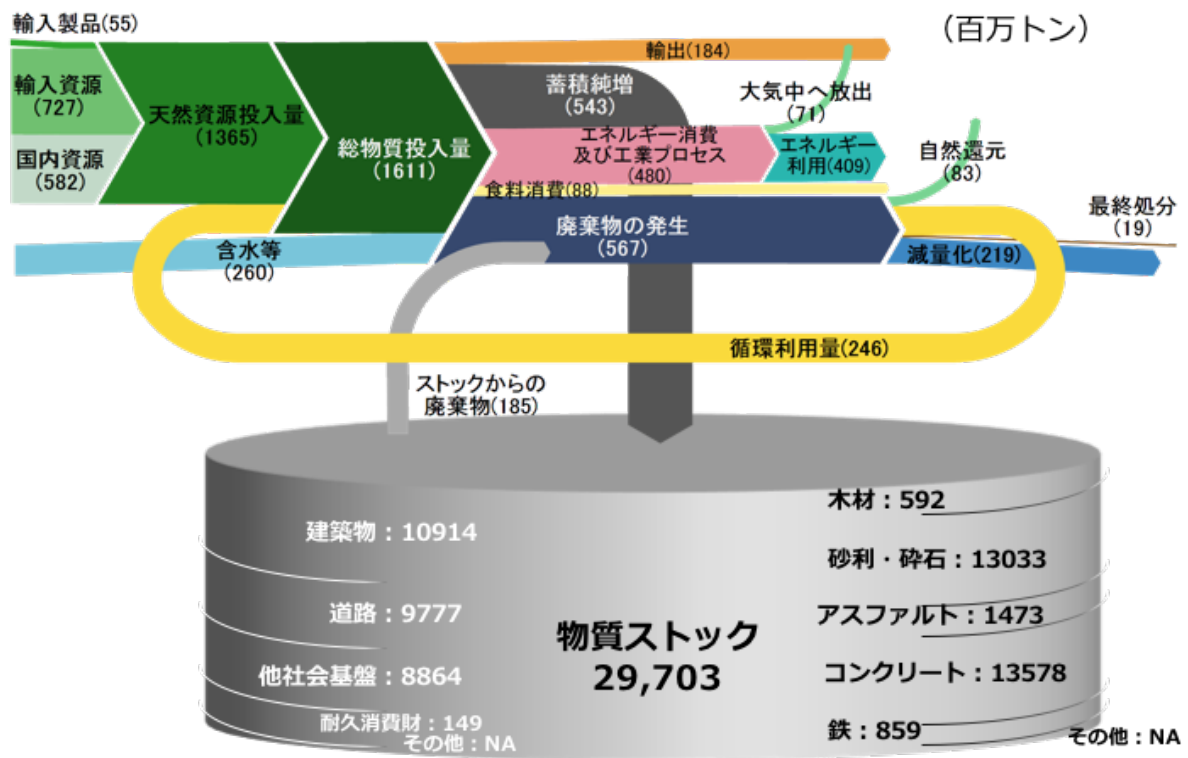
(b) 1995年



(c) 2000年



(d) 2005年



(e) 2010年

図-47 日本の物質ストック・フロー図

(4) 実務ベースの物質ストック把握手法の検討

(4)-1 直接観測による主要耐久消費財のストック量・退役量の把握

今年度は、上記で整理したアプローチのうち直接観測を用いて、主要な耐久消費財のストック量および退役量を把握、作成した。今年度推計対象とした品目は、家電4品目（冷蔵庫、洗濯機、ルームエアコン、テレビ）、携帯電話、乗用車、貨物車の7品目である。なお、冷蔵庫はフリーザーを除く、テレビはブラウン管式および薄型の合計、携帯電話はPHSを除く、乗用車および貨物車は軽自動車も含む定義とした。

まず、統計データを基に各品目のストック台数を作成した。家電4品目については、消費動向調査（内閣府）および全国消費実態調査（総務省）による世帯あたり保有台数（二人以上世帯と単身世帯の別）を基に拡大推計した。消費動向調査は毎年度、全国消費実態調査は5年に1回実施、データ公表がなされている。標本調査の調査誤差や標本の入れ替えに起因すると考えられるばらつきの平準化および5年間隔データの補間のため、誤差最小二乗法によるロジスティック関数近似を行い、各年度末の近似値に世帯数を乗じて国内のストック台数を推計した。携帯電話については契約回線数に等しいと仮定し、一般社団法人電気通信事業者協会による契約数を国内のストック台数とした。乗用車、貨物車については、一般財団法人自動車検査登録情報協会による保有台数をストック台数とした。

次に、各品目について、推計対象年度の販売台数から年度当初と年度末のストック台数の差分、すなわち社会全体の正味の買い増し台数を差し引いて、各年度の退役台数を推計した。販売台数には、冷蔵庫および洗濯機については一般社団法人電機工業会、ルームエアコンについては一般社団法人日本冷凍空調工業会、テレビおよび携帯電話については一般社団法人電子情報技術産業協会の自主統計による国内出荷台数データを、乗用車および貨物車については一般財団法人自動車検査登録情報協会による新車登録台数データおよび一般社団法人全国軽自動車協会連合会による販売台数データを用いた。推計したストック台数および退役台数をそれぞれ図-48、図-49に示す。

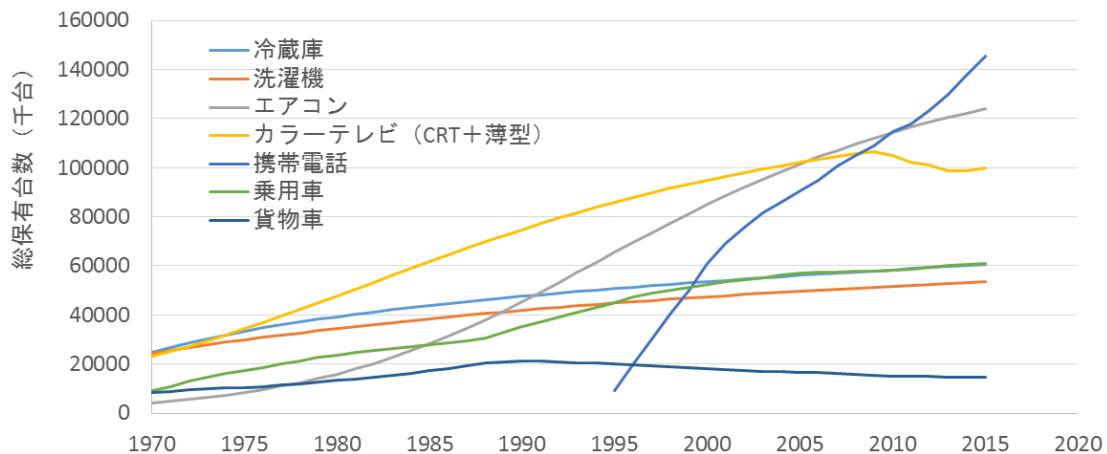


図-48 主要耐久消費財のストック台数推移

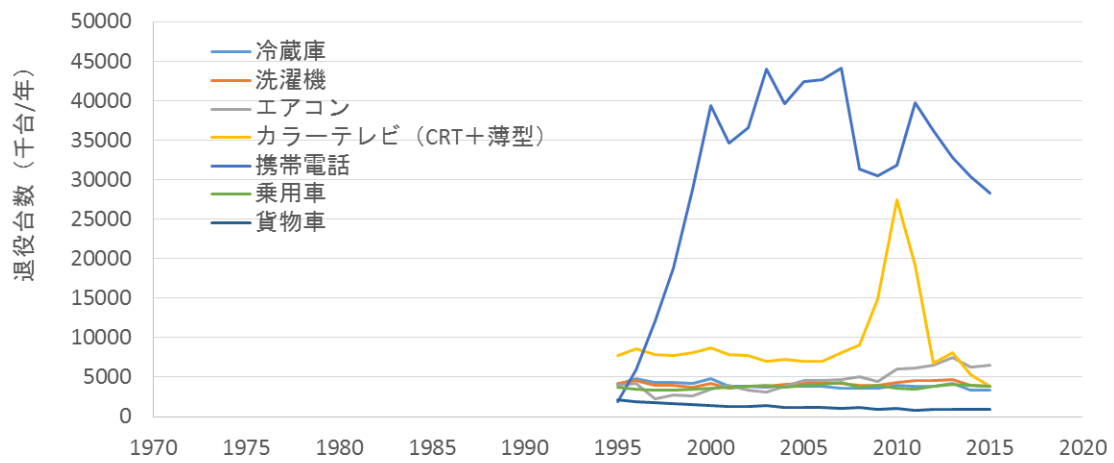


図-49 主要耐久消費財の退役台数推移

(4)-2 物質ストック・フロー指標の検討

(1)と(3)で検討した物質ストック・フロー図より、物質フロー指標に追加して、物質ストック指標を整理・検討した。物質フロー指標は環境省の循環型社会形成基本計画にて達成目標として掲げられているが、本研究の目的でもある物質ストックは物質フローと密接に関わっている。そこで、図-51に示す、3つの物質ストック・フロー指標の検討を行った。「(i)フローとストックの関係」はストックの増大に伴うインフローの変化を表しており、3段階の変化が示される。インフローの急激な増大が示される経済成長の段階、その後の安定的なインフローが保たれる段階、インフローが減少し、蓄積量が飽和に向かう段階、の3段階が示された。今後の予想としては、インフローの減少が一定値に収束し、蓄積量も飽和することが望まれる。「(ii)ストックとGDPの関係」は、ストックの成長とGDPの増加の相関を表したものであり、インフローとGDPにのみ着目して資源の有効利用を表す「資源生産性」に物質ストックの視点を加える指標である。指標の傾きに大きな変化は現れないが、本指標により、物質ストックの充実によりGDPを生み出す関係性が示された。将来的にはストックが飽和した経済社会においてもGDPが成長するパスを示す指標となり得る。「(iii)物質の入れ替わり」では、インフローとストックの比を表しており、物質ストックが飽和した経済社会においては構造物の耐用年数と類似した指標となり得る。しかし、物質ストックには空き家等の効用を發揮していない構造物も含まれているため、現状において、一般的な耐用年数よりも大きな値を示す傾向がある。更新周期が長くなるほど、環境負荷は小さくなると考えられるため、今後の変化を注視する必要がある。

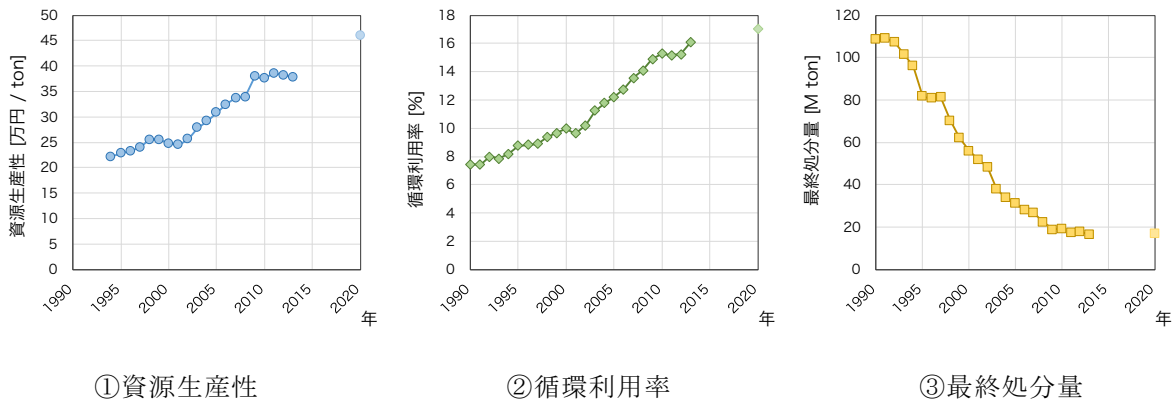


図-50 3つの物質フロー指標

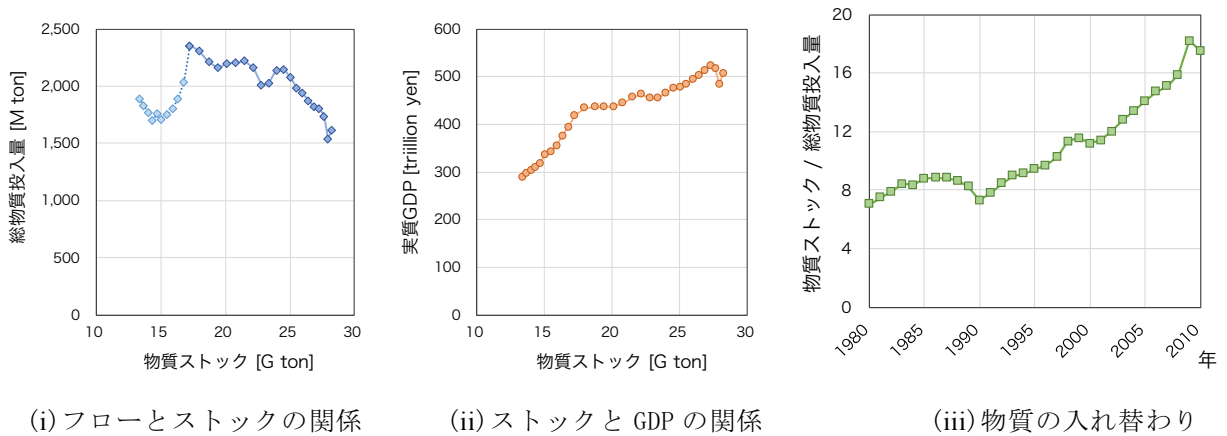
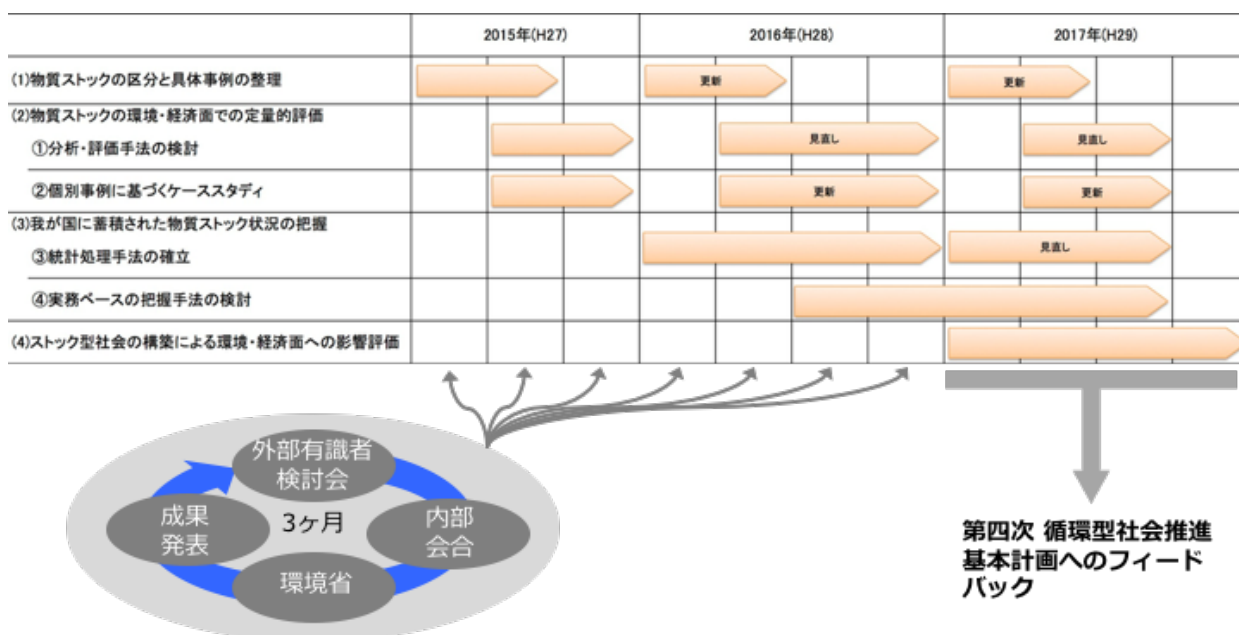


図-51 物質ストック・フロー指標

III. 今後の研究方針

本年度までの研究状況及び今後の研究予定を図-52に示す。本年度では、(1)物質ストックの区分と事例の調査を進めると共に、主として(2)物質ストックの環境・経済面での定量的評価、及び(3)我が国に蓄積された物質ストック状況の把握に務めた。今後の研究方針としては、第四次循環型社会形成推進基本計画へのフィードバックに向けて、実務ベースでの把握処方の検討と共に(4)ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価をとりまとめる。

図-52 本年度までの研究状況及び今後の研究予定



具体的に、今後のデータ充実化について、今回推計を行った対象物の他に、いくつかの対象物について、今後の追加性も含めて方法を検討したため、その結果を以下にまとめた。

①光ファイバケーブル・コード

一般社団法人日本電線工業会の統計データに、主要部門別の出荷実績がある。単位が金額及びコア長となるが、コア長に換算係数を与えることで加えることが可能であると考えられる。ただし、換算係数の検討が必要となる。また、部門別に抽出する場合には、コア長は部門別データがないため、金額比率を利用することが考えられるが、用途別の製品金額の増減が考慮されない点には留意が必要となる。

②ガス管

資源エネルギー庁ガス市場整備課「ガス事業年報」に、材料別（鋳鉄管、鋼管、その他）・内径別・種類別（高圧導管、中圧導管、低圧導管）の導管延長がある。各区分別の重量を設定し推計を行うことが考えられる。これらのデータを利用すると、近年は鋳鉄管や鋼管ではなくポリエチレン管を中心

とした「その他」導管が増加していることから、利用資源の違い等もみることが可能となると考えられる。

③水道管

塩化ビニル管・継手協会の統計データに、水道規模別・管種別（硬質塩化ビニル管、ダクタイル鋳鉄管、鋼管、鋳鉄管、石綿セメント管、その他）の管路延長がある。各区分別の重量を設定し推計を行うことが考えられる。これらのデータを利用すると、近年は以前の石綿セメント管がなくなり、ダクタイル鋳鉄管等が増加している等の利用資源の違い等もみることが可能となると考えられる。

④下水道管

塩化ビニル管・継手協会の統計データに、下水道管の管種別の年度別発注状況がある。各区分別の重量を設定し推計を行うことが考えられる。これらのデータを利用すると、利用資源の違い等もみることが可能となると考えられる。ヒューム管や推進管の土石と金属（鉄）の比率設定等も必要となるが、これらは一般的な組成が公開されていることから、一定の仮定をおき推計が可能であると考えられる。

⑤ダム

日本ダム協会のダム年鑑には、竣工年や堤高・規模別のダム一覧があるため、今後規模別のダムに利用されている資材データを調査し、推計可能か検討が必要となる。

⑥船舶

国土交通省の「造船統計月報」には用途別及び総トン数別の鋼船の竣工実績があるため、用途別の組成を設定することで、推計を行うことが考えられる。鋼船以外では、日本小型船舶検査機構の船舶統計情報に小型船舶登録法に基づき日本小型船舶検査機構に登録されている船舶の船隻数が種別ごとにあり、これらも利用することが可能である。ただし、船舶については、組成の設定の他にも、船籍の問題があり、どの範囲までカバー可能かの検討が必要となる。

⑦航空機

一般社団法人日本航空協会の「航空統計要覧」には日本の登録航空機数が種類別である。組成データは、代表的な機体については、例えば一般社団法人日本鍛造協会が協会誌（JFA_April_No45、「航空機におけるアルミニウム合金の利用の概況と今後」）で掲載しているように、機体別の比率がわかる。本組成情報では航空機の組成は例えば1970年ごろのB747型機ではアルミニウム合金が81%であるのに対し、2010年以降のB787型機ではアルミニウム合金が20%である等、時代による素材の違いがあることがわかるが、4資源別の推計であればあまり影響はないと考えられる。ただし、前述のとおり種類別の航空機のデータはあるが、サイズ等までは不明のため、重量設定で課題が残る。