

断熱材としてのガラス繊維の LCCO₂

宇都宮大学工学部建設学科

岡 建雄

—People and environment-oriented glass— Life cycle CO₂ emission of glass fiber insulation

Tatsuo Oka

Department of Architecture, Utsunomiya University

1. はじめに

住宅に本格的に断熱材が使用され始めてから 35 年以上経過している。当時のコンクリート住宅では天井に繊維系断熱材を使用した¹⁾が、壁はまだ木毛板だった。その後、繊維系断熱材と発泡系断熱材が使用されるようになってきたが、ライフサイクルの視点に立った断熱材の特徴に関してはあまり知られていない。ここでは繊維系断熱材と発泡系断熱材に関して温暖化効果に立脚したライフサイクル評価を記述する。

温暖化ガス排出量を CO₂ 排出量として換算し、繊維系断熱材と発泡系断熱材を使用した場合の住宅の LCCO₂ を計算する。特に発泡剤としてフロンを使用する場合、冷暖房エネルギー削減効果による CO₂ 削減量以上に地球温暖化効果が大きくなる可能性がある²⁾ので、フロンを使っていない断熱材を使用すべきである。

本報告では寒冷地として札幌、標準地域とし

て東京を選定し、断熱材の製造および建物の建設、運用に必要なエネルギー量と CO₂ 排出量を計算した。断熱材の製造に伴う CO₂ 排出量と建物の運用に伴う CO₂ 排出量を比較しようとしたものである。

2. 製造時エネルギー消費量・CO₂ 排出量

札幌と東京はそれぞれ地域Ⅰ、Ⅳに区分されている。札幌と東京における各種断熱材の次世代省エネルギー基準に基づき、断熱仕様を決定した。材料価格は各断熱材製造業者に対するヒアリングから作成したもので、工務店における販売価格である。

この材料価格を使用して、産業連関分析を行い、エネルギー消費量を計算した。発泡剤を使用する断熱材についてはメーカーヒアリングによって、発泡剤の使用量を求め、GWP 100 年値の CO₂ 換算とした(表 1)。断熱材 1 kg あたりの製造に必要なエネルギー量と CO₂ 排出量を表 2 に示す。産業連関分析の結果を検討するために国内外の文献値と比較したところ、およそ一致しており、断熱材の評価に使用できると判断した(表 2)。

〒321-8585

宇都宮市陽東 7-1-2

TEL 028-689-6188

FAX 同上

E-mail : oka@abox9.so-net.ne.jp

表1 発泡系断熱材のフロン含有量とCO₂換算値

断熱材種類	発泡剤	使用量 Wt %	GWP 100年値	含有フロンのCO ₂ 換 算値(kg-CO ₂ /kg)
押し出し発泡ポリス チレンフォーム3種	HFC134a	3	1300	39
硬質ウレタンフォー	HCFC-141	10	700	70
高性能フェノール フォーム	炭化水素	2	4	0.07

表2 産業連関分析の結果(I/O)と国内外の文献値

断熱材種類	CO ₂ 排出量(kg-C)		エネルギー(MJ/kg)			フロン含有量 (kg/kg)
	I/O	国内文献※1	I/O	国内文献※1	海外文献※2,3	
ロックウール	0.2	-	10.7	-	14.8	-
グラスウール	0.6	-	33.8	-	30.3	-
押し出し法ポリスチレンフォーム3種(フロン)	2.2	1.7	118.4	96.5	112	0.07×1300
押し出し法ポリスチレンフォーム1種(ノンフロン)	2.6	1.53	135.3	87.8	117	-
ビーズ法ポリスチレンフォーム(フロン)	2.0	-	108.2	-	-	-
硬質ウレタンフォーム(フロン)	2.1	3.11	113.4	121.1	74	0.05×820
硬質ウレタンフォーム(ノンフロン)	1.9	-	99.6	-	-	-
フェノールフォーム	2.7	-	141.8	-	-	-

※1 新エネルギー・産業総合開発機構、(株)富士総合研究所:地球温暖化に対する断熱材の及ぼす影響に関する調査、平成10年3月

※2 G. Baird他:The energy embodied in building materials-updated New Zealand coefficients and their significance,IPENransactions, Vol.24,No.2/CE, 1997

※3 A.Wilson :Insulation Materials:EnvironmentalComparisons, Environmental Building News, From EBN Volume 4, No.1, 1995.2

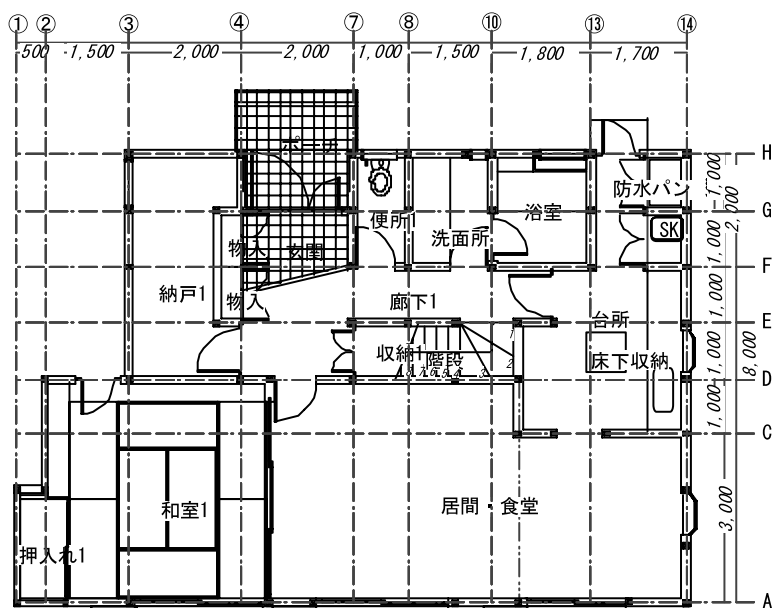
ライフサイクル評価では建材の運送に伴うエネルギー消費量も計算する必要がある。ここでは運送は4t車によるものとした。4t車の荷台寸法から1回の積載量を15m³とし、地域I、IVとも建設現場と工場の距離は50kmであると想定して計算を行った。このような条件で算出した断熱材の製造に伴うエネルギー消費量及びCO₂排出量を表3に示す。

施工時のエネルギー消費量として、人件費によるエネルギー消費、CO₂排出は考慮せず、防湿層(防湿シート、気密テープ)の製造に伴うエネルギー消費量を計上した。

各部の面積は図1に示すモデル住宅による。モデル住宅は在来工法木造2階建て、1階85m²、2階66m²、延床面積151m²とし、見積書の部材価格から産業連関分析によって各工事におけるエネルギー消費量とCO₂排出量を算出

した(表4)。表3、4の値を加算し、モデル住宅製造に必要な全エネルギー消費量とCO₂排出量とする。

断熱材使用量の多い札幌において、ガラス繊維では5.2%に過ぎないが、発泡系断熱材の製造エネルギーは全住宅建設に必要なエネルギー消費量の19.5%に達することがある。CO₂排出量ではガラス繊維系では4.4%であるが、フロンを使用する発泡系断熱材では61.5%に達してしまう。エネルギー消費量に関しては住宅建設という点からは繊維系と発泡系で大差はないものの、CO₂排出量ではフロン含有量により、大きな差が生じてしまう。地球温暖化防止の観点からは、繊維系断熱材か、フロン含有のない発泡系断熱材の使用が好ましいことになる。



モデルハウス 1階平面図 1.

図1 モデル住宅

3. 運用時エネルギー消費量/CO₂排出量

モデル住宅の世帯人数を4人とし、熱負荷計算ソフト『SMASH』を使用して冷暖房負荷を計算した。熱負荷に基づいてFF式ガス暖房機(札幌)とヒートポンプ(東京)の冷暖房用年間ガス消費量と電力消費量を算出した。札幌は冷房をしないと想定している。

冷暖房以外の熱負荷に関しては、家電製品の使用スケジュールを作成し、家電製品用年間電力消費量を算出した。このようにして求めた年間ガス、電力のエネルギー消費量とCO₂排出量を表5に示す。

モデル住宅の耐用年数は30年、更新・改修には毎年、建設に必要なエネルギー消費量の1%が充てられると設定し、運用時の全エネルギー消費量・CO₂排出量をまとめた(表6)。断熱性能を同一として計算しているの、断熱材による相違はない。

4. 廃棄時エネルギー消費量・CO₂排出量

解体工事業者、中間処理業者、総合建設会社にヒアリング調査を行い、廃棄処分費用を解体費用の45%とし、廃棄価格を算出した。ヒアリング調査から断熱材の処理単価を7,000円/m³とした。無機繊維系断熱材は圧縮可能なため、嵩体積をロックウール1/3、グラスウール16Kが1/5、10Kが1/10とし、発泡系断熱材は充填率を考慮し3/2として計算を行った。運送は10t車(30m³積載)を利用し、50km離れた処分場に輸送するとし計算した。

6. ライフサイクルエネルギー/CO₂排出量/コスト(LCE, LCCO₂, LCC)

算出した製造・更新・改修・運用・廃棄時のエネルギー消費量/CO₂排出量/コストを各地域、各種断熱材別にまとめた。地域Ⅰ、Ⅳのライフサイクルエネルギー(LCE)を図2、3に、ライフサイクルCO₂(LCCO₂)を図4、5に示す。

(1) 札幌地域におけるLCEとLCCO₂

最もLCEの小さい断熱材はロックウールと

表3 各種断熱材のエネルギー消費量とCO₂排出量

地域 I (札幌)												
断熱材種類	部位	比重 (kg/m ³)	断熱材製造時		断熱材施工時		含有フロン CO2換算 値 (kg-CO2)	断熱材運搬時		合計		合計 CO2排出量 (kg-CO2)
			エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出 量(kg- CO2)	エネルギー 消費量 (MJ)	CO2排出量 (kg-CO2)		エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出量 (kg-CO2)	エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出 量(kg- CO2)	
ロックウール	天井	40	8,014	549	1,162	80	0	532	37	9,708	666	25,527
	床	40	4,562	313	1,143	79	0	303	21	6,008	413	
	壁	40	7,450	511	1,866	129	0	494	34	9,811	674	
高性能グラスウール 16K	天井	16	10,127	659	1,162	80	0	319	22	11,608	762	30,273
	床	16	5,764	375	1,143	79	0	182	12	7,089	467	
	壁	16	9,414	613	1,866	129	0	297	20	11,577	762	
押出し法ポリスチレンフォーム3種 フロン	天井	32	44,873	3,099	0	0	14,781	1,595	110	46,468	17,990	115,848
	床	32	25,442	1,757	0	0	8,380	908	62	26,350	10,200	
	壁	32	41,548	2,869	0	0	13,686	1,483	102	43,031	16,657	
押出し法ポリスチレンフォーム1種 ノンフロン	天井	20	53,337	3,686	0	0	0	1,009	69	54,346	3,755	135,795
	床	20	30,361	2,098	0	0	0	572	39	30,933	2,137	
	壁	20	49,582	3,426	0	0	0	934	64	50,516	3,491	
ビーズ法ポリスチレンフォーム	天井	27	48,990	3,384	0	0	0	1,679	115	50,669	3,499	126,614
	床	27	27,887	1,926	0	0	0	956	66	28,843	1,992	
	壁	27	45,541	3,145	0	0	0	1,561	107	47,102	3,253	
硬質ウレタンフォーム フロン	天井	30	40,233	2,784	0	0	24,835	1,427	98	41,660	27,717	104,102
	床	30	22,902	1,585	0	0	14,137	812	56	23,715	15,778	
	壁	30	37,401	2,588	0	0	23,087	1,327	91	38,727	25,766	
硬質ウレタンフォーム ノンフロン	天井	30	35,337	2,472	0	0	0	1,007	69	36,344	2,541	90,819
	床	30	20,115	1,407	0	0	0	573	39	20,689	1,446	
	壁	30	32,849	2,298	0	0	0	936	64	33,786	2,362	
高性能フェノールフォーム	天井	27	37,732	2,634	0	0	19	1,007	69	38,739	2,722	6,350
	床	27	21,478	1,500	0	0	11	573	39	22,052	1,550	
	壁	27	35,076	2,449	0	0	17	936	64	36,012	2,531	
注)施工時は防湿層分												
地域 IV (東京)												
断熱材種類	部位	比重 (kg/m ³)	断熱材製造時		断熱材施工時		含有フロン CO2換算 値 (kg-CO2)	断熱材運搬時		合計		合計 CO2排出量 (kg-CO2)
			エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出 量(kg- CO2)	エネルギー 消費量 (MJ)	CO2排出量 (kg-CO2)		エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出量 (kg-CO2)	エネルギー ギー消費 量(MJ)	CO2排出 量(kg- CO2)	
ロックウール	天井	40	5,624	385	1,162	80	0	341	23	7,127	489	18,630
	床	40	3,041	208	1,143	79	0	184	13	4,368	300	
	壁	40	4,967	340	1,866	129	0	301	21	7,134	490	
グラスウール 10K	天井	10	5,844	380	1,162	80	0	224	15	7,231	476	18,880
	床	10	3,160	206	1,143	79	0	121	8	4,424	293	
	壁	10	5,161	336	1,866	129	0	198	14	7,225	479	
押出し法ポリスチレンフォーム3種 フロン	天井	32	31,444	2,172	0	0	10,357	2,241	154	33,685	12,683	81,819
	床	32	17,069	1,179	0	0	5,622	1,212	83	18,280	6,884	
	壁	32	27,874	1,925	0	0	9,181	1,979	136	29,853	11,243	
押出し法ポリスチレンフォーム1種 ノンフロン	天井	20	37,429	2,587	0	0	0	1,076	74	38,505	2,661	93,338
	床	20	20,241	1,399	0	0	0	584	40	20,825	1,439	
	壁	20	33,055	2,284	0	0	0	954	66	34,008	2,350	
ビーズ法ポリスチレンフォーム	天井	27	34,379	2,374	0	0	0	1,793	123	36,172	2,498	87,677
	床	27	18,591	1,284	0	0	0	970	67	19,561	1,351	
	壁	27	30,361	2,097	0	0	0	1,583	109	31,944	2,206	
硬質ウレタンフォーム フロン	天井	30	28,234	1,954	0	0	17,428	827	57	29,061	19,439	70,441
	床	30	15,268	1,056	0	0	9,425	447	31	15,716	10,512	
	壁	30	24,934	1,725	0	0	15,391	731	50	25,664	17,167	
硬質ウレタンフォーム ノンフロン	天井	30	24,798	1,735	0	0	0	584	40	25,382	1,775	61,523
	床	30	13,410	938	0	0	0	316	22	13,726	960	
	壁	30	21,900	1,532	0	0	0	516	35	22,415	1,567	
高性能フェノールフォーム	天井	27	26,479	1,849	0	0	13	1,076	74	27,554	1,936	4,302
	床	27	14,319	1,000	0	0	7	582	40	14,901	1,047	
	壁	27	23,384	1,633	0	0	12	950	65	24,334	1,709	
注)施工時は防湿層分												

表4 モデル住宅の建設に必要なエネルギー消費量とCO₂排出量

工事名	エネルギー消費量(MJ)	CO ₂ 排出量(kg-CO ₂)
仮設工事	11,123	862
基礎工事	51,530	5,497
木工事	83,578	5,761
タイル工事	9,890	670
金属工事	11,226	795
左官工事	1,056	72
木製建具工事	34,107	2,389
金属性建具工事	97,154	7,031
塗装工事	13,722	961
内外装工事	171,432	14,317
雑工事	72,040	5,001
合計	556,858	43,355

表5 運用エネルギーとCO₂排出量

地域Ⅰ(札幌)															
断熱材種類	LCE (GJ)					LCCO ₂ (t-CO ₂)					LCC (千円)				
	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計
ロックウール	608	182	3,212	37	4,038	47	14	69	3	132	26,386	7,916	6,387	2,550	43,240
高性能グラスウール 16K	612	184	3,212	35	4,043	47	14	69	2	133	26,290	7,887	6,387	2,453	43,017
押出し法ポリスチレンフォーム3種 フロン	698	209	3,387	43	4,337	90	27	69	3	189	27,622	8,287	6,387	2,996	45,293
押出し法ポリスチレンフォーム1種	718	215	3,212	48	4,193	55	16	69	3	143	27,894	8,368	6,387	3,457	46,107
ビーズ法ポリスチレンフォーム	709	213	3,212	47	4,180	54	16	69	3	142	27,922	8,376	6,387	3,284	45,970
硬質ウレタンフォーム フロン	686	206	3,212	43	4,147	115	34	69	3	221	27,800	8,340	6,387	2,997	45,525
硬質ウレタンフォーム	673	202	3,387	43	4,304	52	15	69	3	139	27,781	8,334	6,387	2,997	45,500
高性能フェノールフォーム	679	204	3,212	41	4,136	52	16	69	3	139	27,648	8,295	6,387	2,882	45,213

地域Ⅳ(東京)															
断熱材種類	LCE (GJ)					LCCO ₂ (t-CO ₂)					LCC (千円)				
	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計	建設	更新・改修	運用	廃棄	合計
ロックウール	609	183	1,184	35	2,011	47	14	41	2	105	26,973	8,092	2,934	2,473	40,472
グラスウール 10K	609	183	1,184	34	2,010	47	14	41	2	105	26,942	8,083	2,934	2,373	40,331
押出し法ポリスチレンフォーム3種 フロン	672	202	1,184	40	2,098	77	23	41	3	143	27,915	8,374	2,934	2,778	42,001
押出し法ポリスチレンフォーム1種	684	205	1,184	44	2,117	52	16	41	3	112	28,077	8,423	2,934	3,090	42,525
ビーズ法ポリスチレンフォーム	678	203	1,184	43	2,108	52	16	41	3	111	28,069	8,421	2,934	2,973	42,397
硬質ウレタンフォーム フロン	661	198	1,184	40	2,083	93	28	41	3	165	28,076	8,423	2,934	2,777	42,210
硬質ウレタンフォーム	652	196	1,361	40	2,248	50	15	41	3	109	28,065	8,420	2,934	2,777	42,196
高性能フェノールフォーム	657	197	1,184	39	2,077	51	15	41	3	109	27,732	8,320	2,934	2,699	41,685

(住宅使用期間：30年)

表6 ライフサイクルエネルギー／CO₂排出量／コスト (LCE, CCO₂／LCC)

地域Ⅰ(札幌)			
項目	エネルギー消費量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	コスト (千円)
1年当たりの空調機運用エネルギー(/年)	68,550	956	135
耐用年数当たりの空調機運用エネルギー(/30年)	2,056,489	28,674	4,053
1年当たりの家庭用電気機器運用エネルギー(/年)冷暖房を除く	38,516	1,336	78
耐用年数当たりの家庭用電気機器運用エネルギー(/30年)冷暖房を除く	1,155,490	40,075	2,335
耐用年数30年における運用時合計	3,211,979	68,749	6,387

地域Ⅳ(東京)			
項目	エネルギー消費量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)	コスト (千円)
1年当たりの空調機運用エネルギー(/年)	947	33	20
耐用年数当たりの空調機運用エネルギー(/30年)	28,411	985	600
1年当たりの家庭用電気機器運用エネルギー(/年)冷暖房を除く	38,516	1,336	78
耐用年数当たりの家庭用電気機器運用エネルギー(/30年)冷暖房を除く	1,155,490	40,075	2,335
耐用年数30年における運用時合計	1,183,901	41,060	2,934

高性能グラスウールであり、最も大きい断熱材は硬質ウレタンフォームであるが、大きな差はなく、その差は7.4%である。しかしLCCO₂の差はフロンの有無で大きく異なる。最も

LCCO₂の小さい断熱材はロックウールと高性能グラスウールであり、最も大きい断熱材は硬質ウレタンフォームであるが、その差は67.4%に達する。フロンの使用していない断

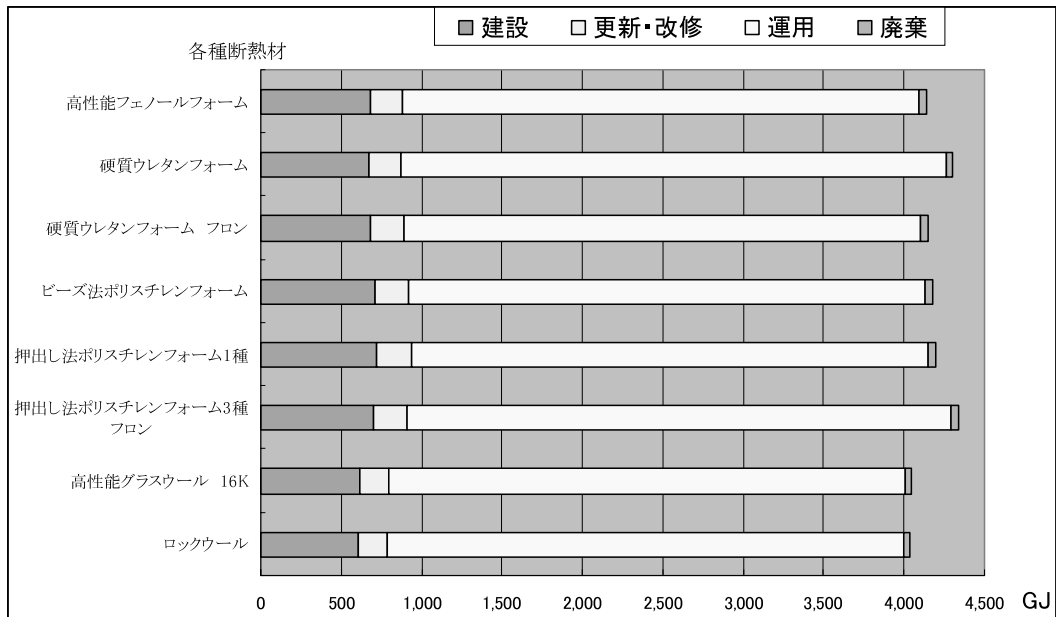
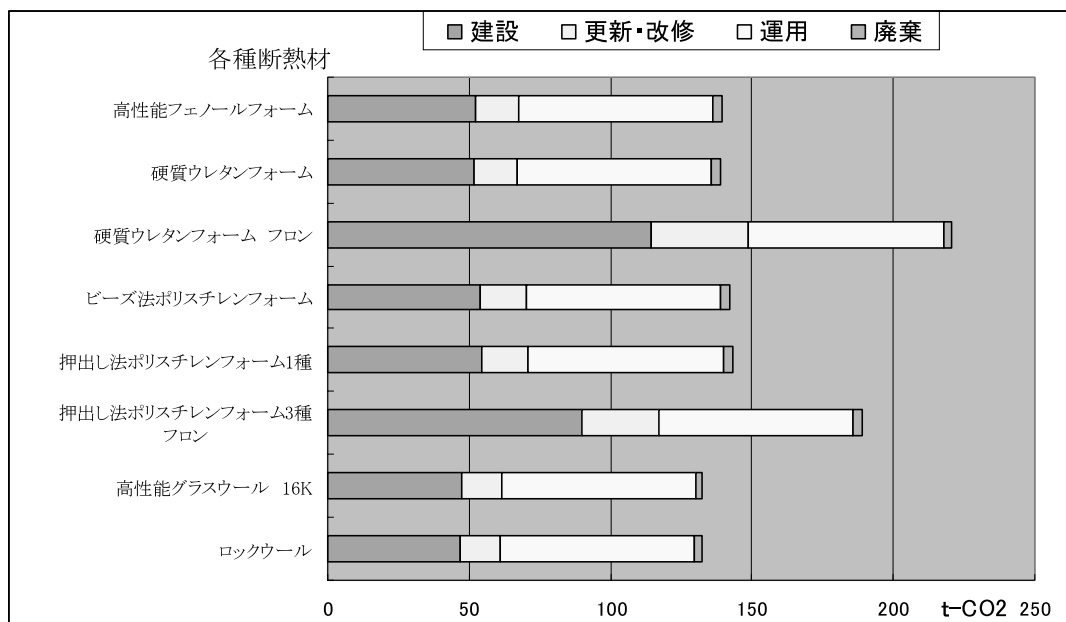


図2 ライフサイクルエネルギー (LCE, 札幌)

図3 ライフサイクル CO₂ (札幌)

熱材の比較では、最大でも 8.3% の相違に過ぎない。

(1) 東京地域における LCE と LCCO₂

暖房エネルギー消費の小さい東京では絶対量として札幌ほど大きい差異は現れない。最も

LCE の小さい断熱材はロックウールと高性能グラスウールであり、最も大きい断熱材は硬質ウレタンフォームであるが、その差は 11.8% である。最も LCCO₂ の小さい断熱材はロックウールと高性能グラスウールであり、最も大きい

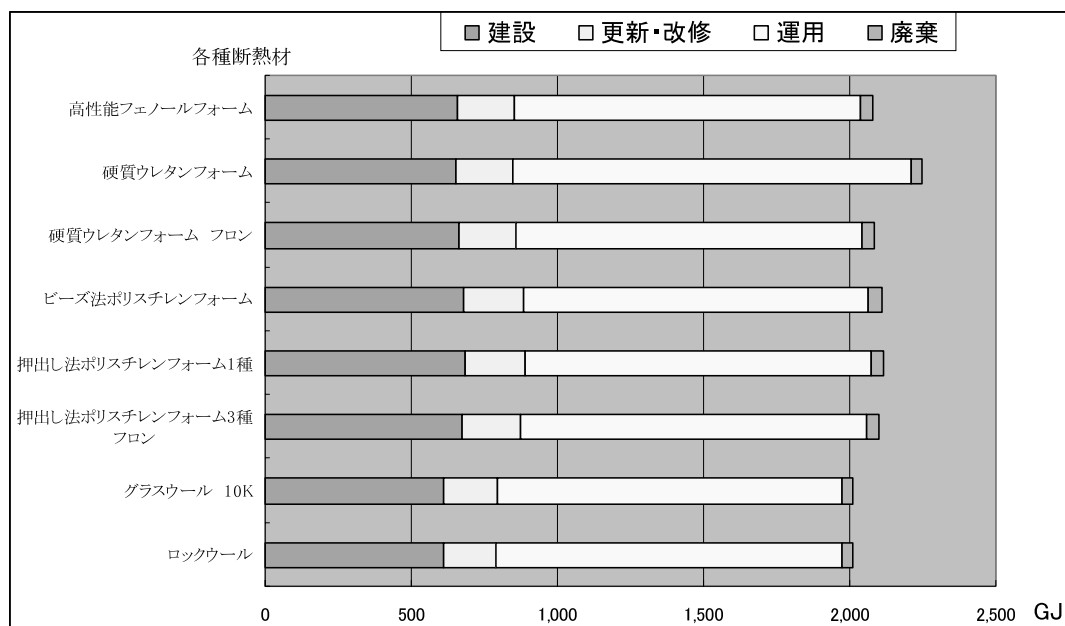
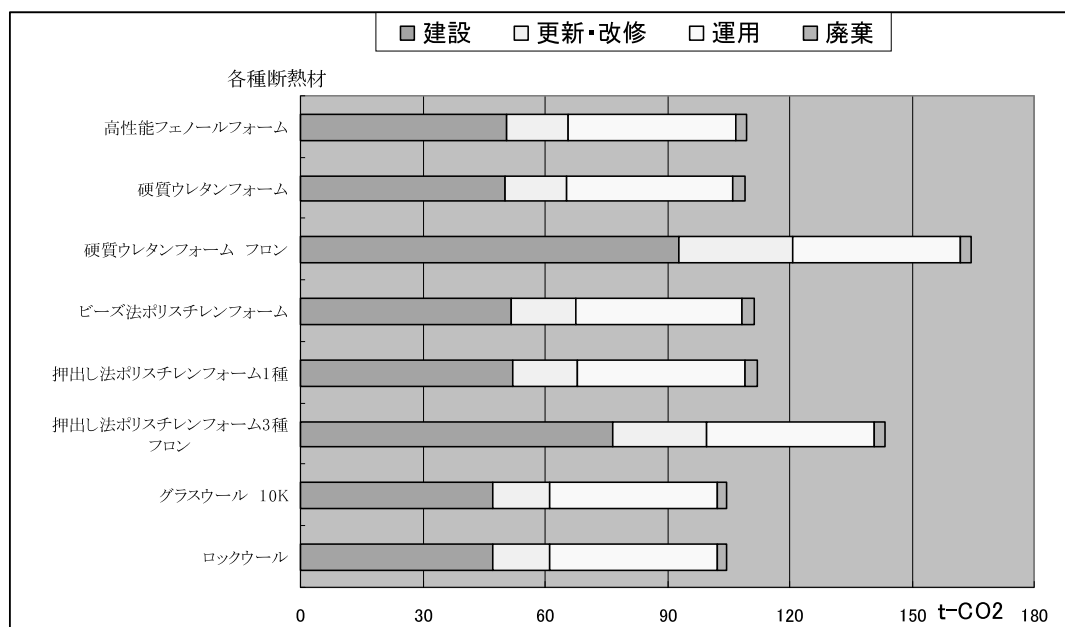


図4 ライフサイクルエネルギー (LCE, 東京)

図5 ライフサイクルCO₂ (LCCO₂, 東京)

い断熱材は硬質ウレタンフォームであるが、その差は63.6%に達する。フロンを使用していない断熱材の比較では、最大でも6.7%の相違に過ぎない。

(3) LCC

運用コストは同一なので、LCCは断熱材の価格差だけである。建設費で見ると、札幌地域で最も高価な断熱材と最も安価な断熱材の差は1,632千円、東京地域では1,104千円の差となっている。ライフサイクルで見ると、解体・廃

棄の影響が大きく、札幌地域では 3,090 千円、東京地域では 2,194 の差が生じている。

7. まとめ

各種断熱材のライフサイクル評価を試みた。ライフサイクルエネルギー／CO₂ 排出量／コストを指標として比較した。繊維系断熱材はフロンを使用する発泡系断熱材に比べ CO₂ 排出量という視点では優れているということが明らかとなった。またエネルギー消費量の点からも繊維系断熱材は優れており、コストからも廃棄処理費用が少なく、優れた断熱材であると言える。

繊維系断熱材は厚くなりやすいために、従来、コンクリート系建物の外壁には施工上、扱いにくいとされてきた。しかし現在では高性能で薄くできる繊維系断熱材が販売されており、施工上の問題は解決されてきた。

フロンを使用しない断熱材に限れば、建物全体として見た場合、断熱材種類による相違はあるものの、断熱材を使用するか、しないかという差に比べれば、その相違は小さいものであ

る。建築雑誌では底のない内外共にコンクリート打ち放しという建物がコンテンポラリーな建物として頻繁に掲載されているのが実情である。断熱材のないコンクリート住宅は人間の住めるような環境ではないことを広く伝えて、断熱材の使用量を底上げすることが我が国の CO₂ 排出量削減と住みよい住環境の形成に直結することを訴えていくことが必要である。

参考文献

- 新エネルギー・産業総合開発機構, (株)富士総合研究所: 地球温暖化に対する断熱材の及ぼす影響に関する調査, 平成 10 年 3 月※1
- G. Baird 他: The energy embodied in building materials—updated New Zealand coefficients and their significance, IPENransactions, Vol. 24, No. 2/CE, 1997※2
- A. Wilson: Insulation arterials: Environmental Comparisons, Environmental Building News, from EBN Volume 4, No. 1, 1995. 2※3
- 社団法人空気調和・衛生学会『住宅における生活スケジュールとエネルギー消費量』※4
- (財)クリーン・ジャパン・センター H 15, 3『建築用断熱材 (押出法ポリスチレンフォーム版) の自己回収システムの講座』
- 財団法人経済調査会後期編 2002 年後期『積算資料』総務省 『平成 7 年版産業連関表』