

低炭素時代における建築構造のあり方に関する研究

建物構造躯体の長寿命化促進の重要性について

A STUDY CONCERNING THE WAY BUILDING STRUCTURE SHOULD BE
IN THE ERA OF LOW CARBON EMISSION
The importance of the promotion of life span extension of building structure

稲田 達夫*

Tatsuo INADA

The global warming issue caused by the increase of atmospheric carbon density is a serious problem that can not be ignored, for grave influence is predicted by abnormal climate, to issues like the rise of the sea level, national land preservation, ecosystem and food problem. In the construction field, especially, the carbon discharge in the operation phase of buildings, a scenario has been presented, showing the possibility of drastic reduction by the National Institute for Environmental Studies and other research institutes. But for the construction phase, quantitative investigation, and the presentation of a scenario to reduce carbon discharge is yet to be done. In this paper, I would like to investigate the method to reduce the carbon discharge at the building construction phase and present the scenario to realize a low carbon emission society. Specially, I would like to show the special importance of the life span extension of building structure.

Keywords : *Global warming issue Reduction of carbon discharge Building material Construction stage Life of the building*
地球温暖化問題 , 二酸化炭素排出量削減 , 建築資材 , 建設段階 , 建物の寿命

1. はじめに

1.1 地球温暖化問題に関する最近の状況

2008年は京都議定書の第1約束期間(2008~2012年)の開始年にあたり、また2009年12月コペンハーゲンで開催されるCOP15では、ポスト京都議定書の枠組の決定が予定されるなど、地球温暖化問題に関する様々な議論、特に2013年以降の気候変動対策を含む、中長期シナリオやビジョンの提示が本格化している。二酸化炭素等温暖化ガスの大気中濃度の上昇と地球温暖化の関係については、賛否両論が繰り広げられてきたが、IPCC第4次評価報告書が提示されたことにより、その因果関係の存在は、「20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇は、その大部分が、人間活動による温室効果ガスの大気中濃度の増加によってもたらされた可能性が非常に高い」とする記述により¹⁶⁾、事実上の決着を見た。地球温暖化問題は、海水面の上昇等の他、異常気象による国土保全・生態系・食料問題等への深刻な影響が予測されることから、無視することのできない重要な問題である。

IPCC第4次報告書では、2050年までに大気中のCO₂濃度を450ppm程度で安定化させるためには、全地球規模で見した場合、現状比で50%を超えるCO₂の排出削減が必要であることが示されている¹⁶⁾。これを受けて、我国政府は先進国としての責任を考慮して、2050年までの長期目標として現状比で60~80%のCO₂排出削減を目指す「低炭素社会づくり行動計画」を2008年7月に閣議決定した。

1997年に締結された京都議定書では、我国に対し6%のCO₂排出削減目標が課せられたが、1990年以降の我国部門別年間CO₂排出量

を見てみると、製造業等の産業部門では基準年1990年に対しCO₂排出量は5.6%の削減となっているのに対し、建物の運用段階のCO₂排出量を示す、業務その他部門、家庭部門のいずれもが、41.7%増(業務部門)、30.4%増(家庭部門)と大幅に増加しており、結果として京都議定書で割り当てられた我国全体で6%の削減目標の達成は困難な状況である。IPCC第4次報告書でも、部門別に見た場合、今後CO₂排出削減の可能性が特に大きいのは建築分野であることが指摘されており、今後建築分野に対しては、さらに高度のCO₂排出削減が求められることは明らかである。

1.2 本論文の目的

以上を受けて、特に建物運用段階におけるCO₂排出量削減については、国立環境研究所等を中心に、様々な定量的検討が進められており¹⁾、結果として2050年を目途としてCO₂排出量の大幅な削減を可能とする具体的シナリオも提示されている。

しかし、建物建設時に排出されるCO₂については、運用段階の約1/2に及ぶことが言われているが⁵⁾、一部で定性的な検討は行われているものの、運用段階と同様の定量的な検討や具体的なCO₂削減のシナリオの提示はなされていないのが実状である。

本論は以上の状況を踏まえ、建設時におけるCO₂排出削減を如何にして進めるかをテーマに、その方法の検討を行い、低炭素社会を実現するための具体的シナリオを提示し、その実現のために克服しなければならない課題を明らかにするのが、本論の目的である。

* (株)三菱地所設計業務推進室 部長・博士(工学)

Mitsubishi Jisho Sekkei Inc., Dr. Eng.

表1 建築物の投入要素別の床面積あたりCO2排出量比率

建設部門 表列名称	構造要素			非構造要素		合計
	コンクリート	鉄筋	鉄骨	その他資材	工事関係	
S工場	18.8%	4.0%	18.6%	29.8%	28.8%	100.0%
S事務所	15.1%	3.3%	14.7%	37.8%	29.1%	100.0%
RC住宅	25.3%	8.9%	2.2%	33.4%	30.3%	100.0%
SRC住宅	22.8%	8.2%	7.5%	31.7%	29.7%	100.0%
RC学校	22.1%	8.4%	3.5%	36.6%	29.5%	100.0%
RC事務所	19.0%	7.0%	4.1%	39.7%	30.2%	100.0%
SRC事務所	16.5%	5.4%	11.1%	37.7%	29.3%	100.0%
集計	19.9%	6.5%	8.8%	35.2%	29.6%	100.0%
		15.3%				
	35.2%			その他	工事関係	
	構造資用材 建築資材					

表2 設備機器製造時に排出されるCO2量

	CO2排出量 ton-CO2/m2
電気設備	0.116
空調設備	0.130
衛生設備	0.071
昇降機設備	0.011
全体	0.328

2. 建築物の建設段階に排出されるCO2量

2.1 既往のデータに基づく分析

日本建築学会編「建物のLCA指針」⁵⁾(以下LCA指針)付表2.4.2には、建築物の投入要素別の床面積あたりCO2排出量(1995年値)が示されている。その内、木造建物を除く7データを抽出し、構造要素および非構造要素に分けて、CO2排出量比率を整理し直したのが表1である。

一方、同じくLCA指針には、標準的事務所建築で使用される設備機器等の製造段階において排出されるCO2量についても分析がなされている。その数値を表2に示す。

2.2 構造資材の生産時において排出されるCO2量

構造資材の生産時に排出されるCO2量を把握するため、著者が所属する設計事務所が最近設計した77棟の建物の構造資材量を調査し、構造資材生産時に排出されるCO2排出量を求めた。その結果を表3に示す。CO2排出量を求めるに当たって使用した、鋼材、鉄筋、生コンのCO2原単位は、LCA指針より、鋼材・鉄筋は1.14ton-CO2/ton、生コンは0.49ton-CO2/tonの値を採用した。

ここで構造資材とは、柱・大梁・小梁・RC壁・床に使用される鉄骨・鉄筋・コンクリートのことであり、杭基礎及び構真柱や止水壁等仮設に要するものは含んでいない。また、生産時とは、鉄骨・鉄筋・コンクリートを工場等で製造する際に排出されるCO2(原料輸送を含む)のことであり、資材の製作工場から工事現場への輸送、建て方等で排出されるCO2量は含んでいない。試みに、表3で、地下階無しの事務所のデータを抽出し、地上部分のCO2排出量の平均値を計算すると、0.300ton-CO2/m2となるが、これはLCA指針付表2.4.2より求まる事務所データの平均値0.292ton-CO2/m2とよく整

表4 建設段階に排出されるCO2量の工事・建築資材別内訳

工事区分	細目	CO2排出量			備考
		比率	単位面積当り (ton-CO2/m2)	比率	
建築工事	地上部分	鋼材・鉄筋	0.144	10.2%	21.2%
		コンクリート	0.155	11.0%	
	地下部分	鋼材・鉄筋	0.050	3.6%	
		コンクリート	0.144	10.2%	
設備工事	非構造要素	0.165	11.7%	23.3%	
	電気設備	0.116	8.2%		
	空調設備	0.130	9.2%		
	衛生設備	0.071	5.0%		
	昇降機設備	0.011	0.8%		
その他		30.0%	0.423	30.0%	
建物全体		100.0%	1.409	100%	

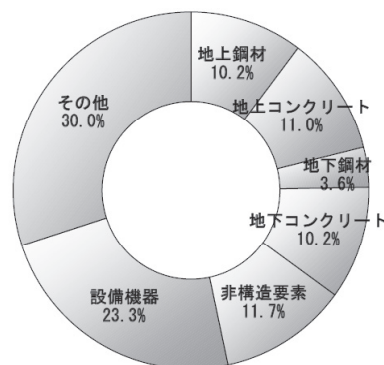


図1 建設時に排出されるCO2量の工事別内訳 (工事関連を含む)

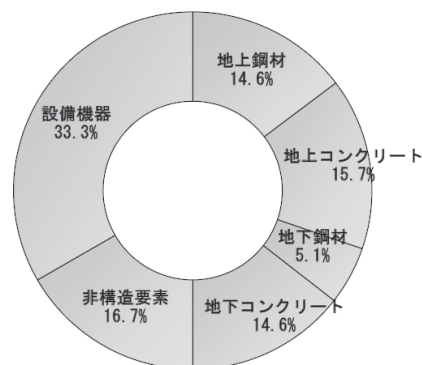


図2 建設時に排出されるCO2量の工事別内訳 (建設資材のみ)

合している。

2.3 建設段階に排出されるCO2量の工事・建築資材別内訳

表1、表2、および表3に基づいて、建物の建設段階において排出されるCO2量の内訳を工事・建築資材別に求めたものを表4に示す。ここで、表4を作成するに当たっては、建物の工事・資材要素別のCO2排出量の比率は表1を用い、構造要素、地上・地下別のCO2排出量の比率は表3を、また設備機器製造時に排出されるCO2量は表2を用い、各数値を算出している。

表4で非構造要素とあるのは、内外装、屋根、床、仕上げ材等の

表3 建物の構造資材から排出されるCO2量

番号	用途	規模		種別	数量(ton)						構造資材製造時に排出される単位面積当たりCO2(ton-CO2/m2)								
		階数			延床面積(m2)	地上			地下(基礎を含む)			地上				地下(基礎を含む)			
		地下	地上			コンクリート	鉄筋	鉄骨	コンクリート	鉄筋	鉄骨	コンクリート	鉄筋	鉄骨	合計	コンクリート	鉄筋	鉄骨	合計
1	学校	0	3	3,985	RC	1,971	297	0	1,375	158	0	0.243	0.085	0.000	0.328	0.170	0.045	0.000	0.215
2	学校	1	5	5,762	RC	2,778	415	0	1,853	221	0	0.237	0.082	0.000	0.319	0.158	0.044	0.000	0.202
3	学校	1	3	3,148	SRC	1,656	239	153	2,033	276	12	0.259	0.087	0.056	0.401	0.318	0.100	0.004	0.422
4	学校	2	5	11,956	SRC	3,111	635	616	5,700	818	122	0.128	0.061	0.059	0.247	0.235	0.078	0.012	0.324
5	工場	0	1	671	S	43	4	71	429	50	0	0.032	0.006	0.121	0.159	0.314	0.085	0.000	0.399
6	工場	0	2	3,294	S	657	68	387	1,452	177	0	0.098	0.023	0.134	0.255	0.217	0.061	0.000	0.278
7	工場	1	5	24,132	S	3,077	261	2,334	10,293	1,033	429	0.063	0.012	0.110	0.185	0.210	0.049	0.020	0.279
8	事務所	0	2	1,495	RC	840	131	26	543	74	0	0.277	0.100	0.020	0.396	0.179	0.057	0.000	0.236
9	事務所	0	3	1,758	RC	286	35	0	362	43	0	0.080	0.023	0.000	0.103	0.101	0.028	0.000	0.129
10	事務所	0	4	991	RC	602	115	7	259	30	0	0.299	0.132	0.008	0.439	0.129	0.034	0.000	0.163
11	事務所	0	2	757	S	137	12	83	286	33	0	0.089	0.019	0.124	0.232	0.186	0.050	0.000	0.235
12	事務所	0	3	2,125	S	318	41	219	366	45	0	0.074	0.022	0.118	0.213	0.085	0.024	0.000	0.109
13	事務所	0	4	9,290	S	1,413	170	937	1,861	200	0	0.075	0.021	0.115	0.211	0.099	0.025	0.000	0.123
14	事務所	0	5	8,357	S	1,246	133	953	1,374	144	0	0.073	0.018	0.130	0.221	0.081	0.020	0.000	0.100
15	事務所	1	6	6,615	S	1,305	135	861	2,257	319	189	0.097	0.023	0.148	0.269	0.168	0.055	0.033	0.255
16	事務所	0	6	12,375	S	2,044	206	1,730	2,823	312	0	0.081	0.019	0.159	0.260	0.112	0.029	0.000	0.141
17	事務所	0	7	4,832	S	732	41	702	571	61	0	0.075	0.010	0.166	0.250	0.058	0.014	0.000	0.073
18	事務所	0	8	5,109	S	762	79	782	799	102	0	0.073	0.018	0.175	0.266	0.077	0.023	0.000	0.100
19	事務所	1	8	3,199	S	436	59	684	1,075	152	64	0.067	0.021	0.244	0.332	0.165	0.054	0.023	0.242
20	事務所	0	9	11,994	S	1,807	225	2,082	2,510	329	59	0.074	0.021	0.198	0.293	0.103	0.031	0.006	0.140
21	事務所	0	9	6,291	S	988	98	890	775	119	0	0.077	0.018	0.161	0.256	0.061	0.022	0.000	0.082
22	事務所	1	10	4,366	S	690	61	797	1,004	138	0	0.078	0.016	0.208	0.302	0.113	0.036	0.000	0.149
23	事務所	0	10	27,507	S	4,756	306	3,616	3,320	360	0	0.085	0.013	0.150	0.248	0.059	0.015	0.000	0.074
24	事務所	1	10	9,156	S	1,235	143	1,098	2,668	367	360	0.066	0.018	0.137	0.221	0.143	0.046	0.045	0.234
25	事務所	1	10	16,542	S	3,290	314	2,395	9,261	1,431	198	0.098	0.022	0.165	0.285	0.275	0.099	0.014	0.388
26	事務所	1	11	10,684	S	1,792	207	1,304	2,633	351	150	0.083	0.022	0.139	0.244	0.121	0.037	0.016	0.175
27	事務所	1	11	1,295	S	198	14	250	489	51	0	0.075	0.012	0.220	0.307	0.186	0.045	0.000	0.231
28	事務所	2	11	9,991	S	1,352	150	1,508	5,705	919	231	0.067	0.017	0.172	0.256	0.281	0.105	0.026	0.412
29	事務所	2	12	9,716	S	1,491	147	1,346	3,494	440	164	0.075	0.017	0.158	0.251	0.177	0.052	0.019	0.248
30	事務所	1	13	14,158	S	2,391	166	1,940	2,452	346	85	0.083	0.013	0.156	0.253	0.085	0.028	0.007	0.120
31	事務所	1	14	19,840	S	2,468	233	2,643	5,605	697	258	0.061	0.013	0.152	0.226	0.139	0.040	0.015	0.194
32	事務所	1	14	10,905	S	1,855	225	1,633	3,108	423	99	0.084	0.024	0.171	0.278	0.140	0.044	0.010	0.195
33	事務所	1	14	10,873	S	1,965	128	1,846	2,788	266	140	0.089	0.013	0.194	0.296	0.126	0.028	0.015	0.169
34	事務所	1	16	23,390	S	3,713	262	2,982	5,422	689	0	0.078	0.013	0.145	0.236	0.114	0.034	0.000	0.148
35	事務所	1	16	15,124	S	2,666	143	2,457	3,367	410	160	0.087	0.011	0.185	0.283	0.110	0.031	0.012	0.152
36	事務所	1	16	52,800	S	8,655	687	7,850	7,754	911	242	0.081	0.015	0.169	0.265	0.072	0.020	0.005	0.097
37	事務所	4	21	60,928	S	7,582	879	10,396	30,190	3,165	1,858	0.061	0.016	0.195	0.272	0.244	0.059	0.035	0.338
38	事務所	2	24	118,365	S	19,539	1,878	25,162	44,188	6,767	2,439	0.081	0.018	0.242	0.342	0.184	0.065	0.023	0.272
39	事務所	2	26	58,902	S	11,817	1,043	10,522	18,222	3,748	1,407	0.099	0.020	0.204	0.323	0.152	0.073	0.027	0.252
40	事務所	4	33	149,037	S	18,723	1,894	33,179	59,433	5,192	5,231	0.062	0.014	0.254	0.330	0.196	0.040	0.040	0.276
41	事務所	4	38	194,033	S	30,519	3,609	33,803	62,824	7,252	4,764	0.077	0.021	0.199	0.297	0.159	0.043	0.028	0.230
42	事務所	1	4	843	SRC	331	56	28	361	53	0	0.193	0.076	0.038	0.307	0.211	0.072	0.000	0.283
43	事務所	0	6	2,938	SRC	1,197	189	247	542	54	0	0.200	0.073	0.096	0.370	0.091	0.021	0.000	0.112
44	事務所	0	6	1,602	SRC	902	107	168	599	59	0	0.277	0.076	0.120	0.473	0.184	0.042	0.000	0.226
45	事務所	0	7	92,940	SRC	13,159	886	8,729	13,958	1,775	0	0.070	0.011	0.107	0.188	0.074	0.022	0.000	0.096
46	事務所	2	7	48,280	SRC	827	130	3,297	20,973	2,113	668	0.008	0.003	0.078	0.089	0.214	0.050	0.016	0.279
47	事務所	1	10	4,859	SRC	718	60	663	1,729	220	49	0.073	0.014	0.156	0.242	0.175	0.052	0.011	0.238
48	住宅	1	2	419	RC	216	28	0	271	34	0	0.254	0.075	0.000	0.329	0.318	0.092	0.000	0.410
49	住宅	0	3	2,296	RC	1,156	141	0	677	68	0	0.248	0.070	0.000	0.318	0.145	0.034	0.000	0.179
50	住宅	1	4	6,401	RC	2,070	293	0	2,305	335	8	0.159	0.052	0.000	0.211	0.177	0.060	0.001	0.238
51	住宅	1	4	15,160	RC	7,209	1,091	0	6,231	803	0	0.234	0.082	0.000	0.316	0.202	0.060	0.000	0.263
52	住宅	0	4	763	RC	481	85	0	208	27	0	0.310	0.126	0.000	0.437	0.134	0.041	0.000	0.174
53	住宅	0	7	2,084	RC	1,377	203	0	450	52	0	0.325	0.111	0.000	0.436	0.106	0.028	0.000	0.134
54	住宅	0	7	1,483	RC	1,054	182	0	261	31	0	0.350	0.140	0.000	0.489	0.086	0.024	0.000	0.111
55	住宅	0	8	5,333	RC	3,294	1,014	0	766	93	0	0.304	0.217	0.000	0.521	0.071	0.020	0.000	0.090
56	住宅	0	8	9,452	RC	5,925	890	0	1,170	158	0	0.308	0.107	0.000	0.416	0.061	0.019	0.000	0.080
57	住宅	0	8	17,184	RC	7,829	1,121	0	2,646	312	0	0.224	0.074	0.000	0.299	0.076	0.021	0.000	0.096
58	住宅	0	8	10,055	RC	4,497	662	0	1,819	196	0	0.220	0.075	0.000	0.295	0.089	0.022	0.000	0.111
59	住宅	0	8	7,462	RC	3,387	507	0	1,342	147	0	0.223	0.077	0.000	0.301	0.088	0.022	0.000	0.111
60	住宅	0	9	8,205	RC	3,928	590	0	1,662	214	0	0.236	0.082	0.000	0.318	0.100	0.030	0.000	0.129
61	住宅	1	14	2,483	RC	2,062	333	0	305	26	0	0.409	0.153	0.000	0.561	0.060	0.012	0.000	0.073
62	住宅	2	17	21,462	RC	10,473	1,948	0	8,801	1,311	0	0.240	0.103	0.000	0.344	0.202	0.070	0.000	0.271
63	住宅	1	20	8,987	RC	4,799	1,010	0	1,583	265	0	0.263	0.128	0.000	0.391	0.087	0.034	0.000	0.120
64	住宅	2	24	13,470	RC	8,289	1,304	0	2,068	348	0	0.303	0.110	0.000	0.413	0.076	0.029	0.000	0.105
65	住宅	1	24	83,006	RC	28,501	3,971	953	12,886	1,992	0	0.169	0.055	0.013	0.237	0.076	0.027	0.000	0.104
66	住宅	1	30	153,716	RC	70,698	14,500	675	37,571	7,483	0	0.226	0.108	0.005	0.339	0.120	0.055	0.000	0.176
67	住宅	2	12	30,938	SRC	15,535	2,305	2,119	14,883	1,758	0	0.247	0.085	0.078	0.410	0.237	0.065	0.000	0.301
68	住宅	1	13	5,626	SRC	3,029	327	0	1,084	129	654	0.265	0.066	0.000	0.331	0.095	0.026	0.133	0.253

製造時に排出されるCO₂量のことである。またその他とあるのは、工事関連で排出されるCO₂量のことであり、工所用重機類の運転、資材の工場から工事現場への輸送、工事現場の照明、空調等により排出されるCO₂量を含むことになる。

以上より、建設時に排出されるCO₂量の工事別内訳は下記のように整理できる。

- ① 以上の分析によれば、建物建設段階のCO₂排出量の内訳は、建設資材製造に関するものが70%、輸送・工事等建設工事関連で排出されるものが30%である。これは、例えば文献¹⁴⁾では、前者が65%、後者が35%となっており、概ね整合している。
- ② 建物建設段階で建築資材の製造で排出される単位面積当たりのCO₂量は、約1ton-CO₂/m²である。これについては、LCA指針ではS造事務所の場合579kg-CO₂/m²、RC事務所の場合936.6kg-CO₂/m²、SRC事務所の場合1217kg-CO₂/m²というデータが示されているが、表3のデータは、S造の場合も地下階はSRCで造であり、結果としてはLCA指針のRC事務所に近い値となっており、概ね妥当な数値と判断できる。
- ③ 建物建設時に構造資材の製造により排出されるCO₂量は、①の約50%である。その内訳としては、地上部分が60%、地下部分が40%である。
- ④ 設備機器の製造により排出されるCO₂量は①の約35%である。
- ⑤ その他、内外装等非構造要素の製造時に排出されるCO₂量は、①の15%である。

以上をグラフにまとめると、図1、図2の通りとなる。

3. 建築分野におけるCO₂排出削減のシナリオ

3.1 仮定条件

1章では、地球温暖化の進行は既に限界まで来ており、その問題克服のためには、全地球規模でCO₂排出量を50%以上削減することが必要であること、および我国はそれを受けてCO₂排出量を60~80%削減することを2008年7月閣議決定したことを述べた。さらに、建築分野に対しては、部門別に見た場合のCO₂の排出削減の余地が特に大きいことから、さらに高度な削減量が求められていることを述べた。2章では、既往の研究および筆者の行った分析から、特に建設段階についてCO₂が、建築資材・工事区分ごとに、どのような配分で排出されているかを示した。

本章では、以上の検討を踏まえ、まず建設段階および建築分野全体におけるCO₂排出削減の方策として、どのようなことが考えられるかを示し、次に建築分野に課せられた高度なCO₂排出削減の目標を達成するための具体的シナリオを提示する。

まず最初に、建築分野全体のCO₂排出削減の方策・シナリオを検討するために必要な仮定条件を整理したので、その結果を表5に示す。

3.2 建築分野におけるCO₂排出削減の方策

本節では建物の建設資材、および工事・運用段階を含めた建物のライフサイクルにおけるCO₂排出削減の方策について検討する。対象とする建物は、厳密にはライフサイクルにおいて、表5に示す構成でCO₂が排出される建物ということになるが、表5に示す仮定が、

表5 建設段階におけるCO₂排出削減を検討する上での仮定条件

番号	仮定項目	仮定条件
1	我国の建築分野より排出されるCO ₂ 量	我国全体の1/3
2	建設段階に排出されるCO ₂ 量 (工事関連を含む)	我国建築分野全体の1/3
3	建設資材の製造で排出されるCO ₂ 量 (工事関連を含まない)	建設段階全体の70%
4	構造資材の製造で排出されるCO ₂ 量	建設段階全体の35% (建設資材全体の50%)
5	設備機器の製造で排出されるCO ₂ 量	建設段階全体の23.3% (建設資材全体の1/3)
6	非構造要素の製造で排出されるCO ₂ 量	建設段階全体の11.7% (建設資材全体の1/6)
7	建物の工事に関連して排出されるCO ₂ 量	建設段階全体の30%
8	地上工事で排出されるCO ₂ 量 (構造資材のみ)	建設資材全体に対し 鋼材:15% コンクリート:15%
9	地下工事で排出されるCO ₂ 量	建設資材全体に対し 鋼材:5% コンクリート:15%

現状における住宅、非住宅を含む複数用途の建物の平均的なCO₂排出量の構成であり、かつ本章の検討では将来の技術革新による排出削減量および建物の供用期間延伸の効果も含むことから、2050年頃を想定した建物のライフサイクルにおける、現状に対するCO₂排出削減の方策と見ることもできる。

建築分野におけるCO₂排出削減の方策としては、(1)建築資材のリサイクル・リユース等建設資材についての工夫、(2)資材の輸送等、建築工事上の工夫、(3)空調・照明等、建物運用段階における工夫、(4)スケルトンインフィル等を含めた建物の長寿命化が考えられる。具体的内容としては、以下が上げられる。

(1) 建設資材についての工夫

①電炉鋼材の活用

資源循環の視点から見た場合、リサイクルが最も進んでいるのは、鋼材である。鋼材のスクラップは、電炉メーカーに送られることにより、ほぼ100%リサイクルの後活用されている。電炉鋼材を使用することにより、CO₂排出は高炉材の1/3程度に削減されるが、現状において既に建設資材の50%は電炉材が使われており¹⁵⁾、原料となるスクラップの供給にも限界があることから、ここでは適用は20%程度と想定した。

②エコセメントの活用

コンクリートについては、コンクリートガラ等のリサイクル率は約75%と比較的高いが、その多くは路盤材等へのカスケード利用が主であり、再生骨材として新築建物にリサイクルされる比率は未だ少ないのが実状である。但し、他産業で発生した廃棄物(焼結灰、高炉スラグ等)をセメントに投入することにより、CO₂排出を抑えるエコセメントの利用は進んでおり、通常使用される普通コンクリートでも、20%程度の廃棄物の混入が行われている。セメ

表6 CO2 排出削減の可能性の想定

番号	方法	改善項目	CO2排出削減効果(想定)	建物単位面積当たりの削減効果	
				建設資源について(長寿命化を含む)	工事・運用段階を含む
1	(1)建設資材についての工夫	電炉鋼材の活用	CO2排出は高炉材の1/3程度に削減されると想定。但し、既に建設資材の50%は電炉材であり、スクラップの供給能力も限界があることから、適用は20%程度と想定。	地上:15×0.2×2/3=2%削減 地下:5×0.2×2/3=0.66%削減 (全体で2.66%削減)	地上:2/3×0.7=0.47%削減 地下:0.66/3×0.7=0.16%削減 (全体で0.63%削減)
2		エコセメントの活用	セメントへの廃棄物等投入量を増やすことにより、CO2排出は通常の1/2程度に削減されると想定。但し、既に使用しているものもあり、原料の供給能力も限界があることから、適用は20%程度と想定。	地上:15×0.2/2=1.5%削減 地下:15×0.2/2=1.5%削減 (全体で3%削減)	地上:1.5/3×0.7=0.35%削減 地下:1.5/3×0.7=0.35%削減 (全体で0.7%削減)
3		建材のリユース	現状では、非構造要素の20%程度について適用が可能と想定する	16.6×0.2=3.33%削減	3.33/3×0.7=0.77%削減
4		鋼材製造の直接還元法への切り替え	CO2排出は高炉材の1/3程度に削減されると想定。但し、建設資材の50%は電炉材であり、製造ラインの整備も容易ではないことを考慮して、適用は20%程度と想定する。	地上:15×0.2×2/3=2%削減 地下:5×0.2×2/3=0.66%削減 (全体で2.66%削減)	地上:2/3×0.7=0.47%削減 地下:0.66/3×0.7=0.16%削減 (全体で0.63%削減)
5		化石燃料を使用しないエネルギー源の開発	上限で80%程度まで、(原子力発電・太陽光発電等に)切り替え可能と想定	—	—
6		使用するエネルギー源を上記に切り替え	電炉鋼材、直接還元法により製造される鋼材は、切り替え可能と想定	地上:(2+2)×0.9=3.2%削減 地下:(0.66+0.66)×0.8=1.1%削減 (全体で4.8%削減)	地上:3.2/3×0.7=0.75%削減 地下:1.1/3×0.7=0.26%削減 (全体で1.01%削減)
7	(2)工事	建設工事における工夫	輸送等の動力を電気方式に切り替えること等により、50%程度の削減は可能と想定	—	30/3×0.5=5.0%削減
8	(3)運用段階	省エネによる	運用段階に対し50%程度のCO2削減を想定	—	50×2/3=33.3%削減
9		使用するエネルギー源を5に切り替え	上記と合わせて運用段階に対し90%程度の削減が可能と想定	—	上記と合わせて、90×2/3=60%削減
10	(4)長寿命化	地下躯体のリユース(供用期間延伸)	現状供用期間35年に対し地下躯体の寿命を地上の2倍延伸させると想定。初期資材の増加も地上の2倍と想定	$(20-20 \times (1+2 \times \alpha / 100) / (2 \times n1))\%$ 削減	$(20-20 \times (1+2 \times \alpha / 100) / (2 \times n1)) / 3 \times 0.7\%$ 削減
11		構造躯体の供用期間延伸	現状35年と想定し、n1倍延伸させると仮定但し、n1に応じて初期資材の増加量α%を考慮する	$(30-30 \times (1+\alpha / 100) / n1)\%$ 削減	$(30-30 \times (1+\alpha / 100) / n1) / 3 \times 0.7\%$ 削減
12		設備機器の供用期間延伸	現状20年と想定し、n2倍延伸させると仮定但し、n2に応じて初期資材の増加量β%を考慮する	$(33.3-33.3 \times (1+\beta / 100) / n2)\%$ 削減	$(33.3-33.3 \times (1+\beta / 100) / n2) / 3 \times 0.7\%$ 削減
13		非構造要素の供用期間延伸	現状15年と想定し、n3倍延伸させると想定但し、n3に応じて初期資材の増加量γ%を考慮する	$(16.7-16.7 \times (1+\gamma / 100) / n3)\%$ 削減	$(16.7-16.7 \times (1+\gamma / 100) / n3) / 3 \times 0.7\%$ 削減

ントへの廃棄物の投入量を増やすことにより、CO2 排出は通常の1/2 程度に削減されるが、現状において既に一部使用が進んでおり、原料の供給にも限界があることから、今後の適用は 20%程度と想定した。

③建材のリユース

外装材・内装材等、建築資材のリユースの試みは、徐々に進められているが、コスト的にもメリットのあるものは未だ少ないのが実状である。ここではそのような状況も勘案し、今後の適用は、非構造要素の 20%程度と想定した。

④鋼材製造法の直接還元法への切り替え

今後新たに実現される可能性のある技術革新の一つとして、鉄鉱

石(酸化鉄)をコークスに代えて水素で還元することにより、CO2 排出を大きく抑えた鋼材の製造法である直接還元法が上げられる。これにより CO2 排出は高炉材の 1/3 程度に削減されることになるが、既に建設資材の 50%は電炉材であり、製造ラインの整備も容易ではないことを考慮して、今後の適用は 20%程度と想定した。

⑤熱源の再生可能エネルギーへの切り替え

建築資材の製造で必要な熱源を再生可能エネルギーに切り替えることにより、CO2 排出はさらに抑制が可能となる。ここでは、電炉鋼材、直接還元法により製造される鋼材について、将来 80%の熱源が再生可能なものに切り替え可能と想定した。

表7 ステージ別 CO2 排出削減のシナリオ (運用段階・工事関係を含まない場合)

ステージ	シナリオ	CO2削減方法	表10	CO2削減
1	現状可能な技術の範囲 市場経済への影響は少ない	資材のリサイクル・リユースの徹底	1,2,3	9.0%削減
2	新たな技術開発が必要 市場経済への影響は少ない	鋼材製造の直接還元法への切り替え	4	11.7%削減
3		使用するエネルギー源の切り替え	5,6	16.0%削減
4	建物の長寿命化を図る 新築市場の縮小に繋がる	地下躯体のリユースの徹底 (地下躯体の供用期間10倍延伸、 長寿命化に伴う資材の増加20%)	10	33.6%削減
5		構造躯体の供用期間5倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	11	57.0%削減
6		設備機器の供用期間2倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	12	71.9%削減
7		非構造要素の供用期間2倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	13	79.5%削減

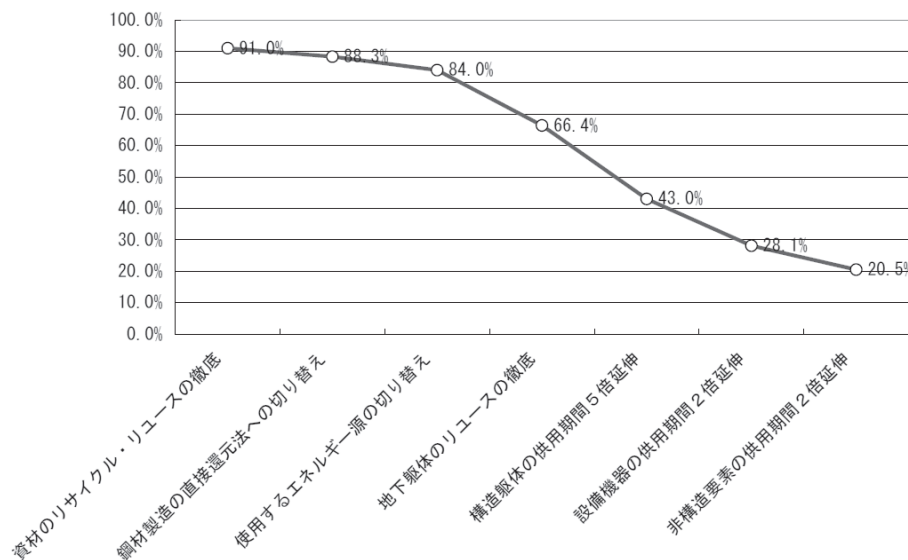


図3 ステージ別CO2削減率の推移
(運用段階・工事関連を含まない場合)

(2) 建築工事上の工夫

工事に用いる機械、建設資材の輸送等で使用する動力を電気方式に切り替えること等により、建築工事においてもCO2の削減は可能である。ここではそのような工夫により、50%程度のCO2排出の削減は可能と想定した。

(3) 建物の運用段階における工夫

建物運用段階におけるCO2削減の方策については、国立環境研究所等より大胆なシナリオが示されている。⁴⁾この報告によれば、省エネの徹底によりCO2排出を50%削減し、さらにエネルギー源を再生可能なものに切り替えることにより、建物運用段階におけるCO2

排出を最大で90%以上削減可能であることが述べられている。ここではこの報告を基本として、検討を進めることにする。

(4) 建物の長寿命化

建設段階におけるCO2排出を削減する最も有効な方策は、建物の長寿命化の促進である。建物の長寿命化については以下の4つに分けて検討する。尚、今回の検討では、長寿命化に起因する高性能化に伴う初期資材量のアップも考慮して検討を進めることとする。

① 地下躯体のリユース (供用期間延伸)

第2章の分析より、建物地下躯体のリユース (供用期間延伸) はCO2排出削減に大きな効果が期待できると思われることから、これについて今回の検討の対象に加えることにする。具体的には、地下躯体の寿命を地上の2倍程度に延伸させると想定した。その際、初期資材の増加量も地上躯体の2倍程度と想定する。

② 地上躯体の供用期間の延伸

現状において、建物の寿命は平均で35年程度と言われているが、それをn1倍延伸させると仮定して検討を進める。但し、n1に応じて初期資材の増加量α%を考慮する

③ 設備機器の供用期間の延伸

現状において、設備機器の供用期間の平均は20年程度と思われるが、それをn2倍延伸させると仮定して検討を進める。但し、n2に応じて初期資材の増加量β%を考慮する

④ 非構造要素の供用期間の延伸

現状において、建物の非構造要素の供用期間の平均は15年程度と思われるが、それをn3倍延伸させると仮定して検討を進める。但し、n3に応じて初期資材の増加量γ%を考慮する

以上に基づいて、CO2排出の削減効果を、建設資材および、建設工事・建物の運用段階を含めたライフサイクルについて、個々の要素別に整理したので、その結果を表6に示す。

3.3 建設段階におけるCO2排出削減のシナリオ

ここでは、建物運用段階および建築工事を除く、建設資材の製造を中心とした建物の建設段階で排出されるCO2量を対象として、CO2排出削減目標を達成するためのシナリオを検討する。その具体的な内

表8 ステージ別 CO2 排出削減のシナリオ (建設部門全体についてのシナリオ)

ステージ	シナリオ	CO2削減方法	表10	CO2削減
1	現状可能な技術の範囲 市場経済への影響は少ない	資材のリサイクル・リユースの徹底	1,2,3	2.1%削減
2	新たな技術開発が必要 市場経済への影響は少ない	鋼材製造の直接還元法への切り替え	4	2.7%削減
3		使用するエネルギー源の切り替え	5,6	3.7%削減
4		建設工事における工夫	7	8.7%削減
5		運用段階における省エネの徹底	8	42.1%削減
6		使用するエネルギー源の切り替え	9	68.7%削減
7	建物の長寿命化を図る 新築市場の縮小に繋がる	地下躯体のリユースの徹底 (地下躯体の供用期間10倍延伸、 長寿命化に伴う資材の増加20%)	10	72.8%削減
8		構造躯体の供用期間5倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	11	78.3%削減
9		設備機器の供用期間2倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	12	81.8%削減
10		非構造要素の供用期間2倍延伸 (長寿命化に伴う資材の増加10%)	13	83.6%削減

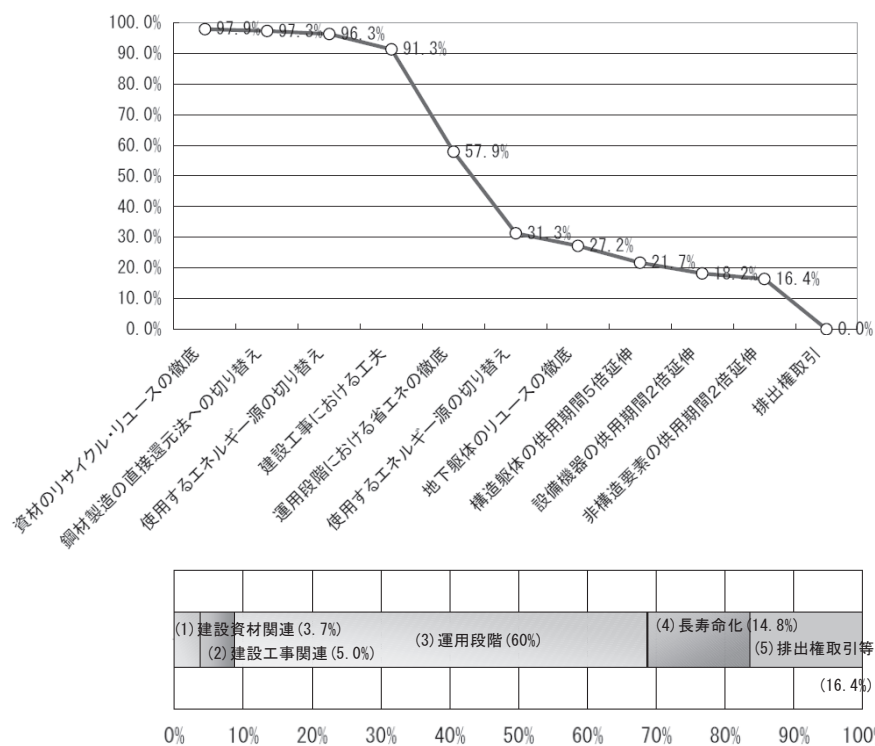


図4 ステージ別CO2削減率の推移 (建設部門全体のシナリオ)

容および結果を表7および図3に示す。

図より明らかなこととしては、高度なCO2 排出削減目標を達成するためには、現状可能な技術の他、直接還元法の開発等、新たな技術開発の成果を踏まえたとしても、不十分であり、建物の長寿命化を図ることが必要であることがわかる。

3.4 建築分野全体における CO2 排出削減のシナリオ

3.2 節の結果に基づき、建設工事および建物運用段階を含めた建築分野全体におけるCO2 排出削減のシナリオを検討し、整理した内容を表8および図4に示す。表8、図4より明らかなこととしては、高度なCO2 排出削減を達成するためには、建物運用段階における努力や、技術革新を含めた建築資材に関する試みだけでは不十分であり、建物の寿命延伸を図ることにより、初めて達成可能となることがわかる。

4. まとめ

IPCC 第4次報告書等が求める、建築分野に対する高度なCO2 排出削減要求を達成するための方策について、以下のような手順で検討を行った。

LCA 指針等に記載された既往のデータに、著者の所属する設計事務所が最近設計した77棟の建物のデータを付加して整理することにより、建物建設時に排出されるCO2量を資材・工種・部位別に整理した。その整理したデータに基づいて、建設時に排出されるCO2量の削減の方策を検討し、建物の建設時および工事・運用段階を含めた建物ライフサイクルにおけるCO2 排出削減のシナリオを検討した。その結果以下の事柄が明らかとなった。

①建設部門全体で見た場合、建物運用段階における省エネの徹底は、CO2 排出の削減効果が極めて大きい。

②電力供給をCO2を排出しない発電方式に切り替え、かつ設備機器類(空調機器・給湯機器・炊事機器等)を電気方式に切り替えることにより、さらに大きなCO2 排出削減効果が期待できる。これについては、2008年7月の閣議決定で、2030年までに太陽光発電の発電量を現状比で40倍とすることが盛り込まれているが、例えばそれが実現すれば、理論上は石油・石炭による発電は

かなり少量で済ませることもできる。

③しかし、①および②だけでは、建設部門全体でのCO2排出量削減は、60%程度に留まる。建物建設段階における、CO2排出削減も併せて検討する必要がある。

④建設時におけるCO2排出削減の方策でまず重要なのは建設資材製造時の工夫である。建設資材原料（鋼材、木材、ガラス等）のリサイクル、及び建材のリユースの徹底の他、製造法のCO2を排出しない方式等への切り替え等も考えられるが、それによるCO2排出削減は、建物建設時（運用段階・工事関連を含まない場合）に対し、十数%に留まる。高度なCO2排出削減要求に応えるためには、建物寿命の延伸を図ることが不可欠である。

以上より、冒頭に掲げた全地球規模でのCO2排出50%削減、それを実現するために必要となる我国のCO2排出削減目標60～80%を達成することは決して容易ではなく、建設全分野を上げた弛まぬ努力が不可欠であることを示した。また、低炭素時代における建築構造のあり方として、建設部門全体におけるCO2排出削減を進めるためには、建物の構造躯体の長寿命化を促進することが、重要であることを示した。構造躯体の長寿命化の促進を進める上で、今後検討すべき課題としては以下が挙げられる。

①建物建設段階において特にCO2排出が多いのは地下躯体建設時である。スケルトン・インフィルの視点からの地下構造のあり方についての検討が必要である⁶⁾。

②建物の寿命延伸は、新築市場の縮小を意味し、国内経済への影響が懸念される。国土交通省の統計によれば、ストック時代の到来のスローガンの基、公共工事等が減少した結果、新築着工面積は1990年比で既に7割以下に減少している³⁾。新築市場から、リニューアル市場等新しい市場領域への移行について、早急に検討されるべきである。

③建物の長寿命化が望まれる一方で、新耐震基準制定以前に建設された既存不適格建築の更新の問題も緊急の課題として指摘されている。このような相矛盾する問題をいかにして克服して行くかも重要な課題である。¹²⁾

④今後予想される人口の減少、景気の変動に伴う新築着工面積の増減、既存建築ストックの変動等、中長期的な社会・経済・文化の動向が及ぼすCO2排出量への影響は複雑であり、また無視することのできない重要な問題である。今後は、このような問題にも着目した検討をさらに進めることが必要である⁷⁾¹³⁾。

参考文献

- 1) 環境省：平成19年版環境・循環型社会白書，2007.4
- 2) 環境省：平成20年版環境統計集，2008.4
- 3) 国土交通省：平成19年度国土交通白書，2007.4
- 4) 藤沼康実、下田吉之、佐土原聡：家庭・業務部門の温暖化対策，（独）国立環境研究所地球環境研究センター，2008.2
- 5) 日本建築学会：建物のLCA指針，2006.11
- 6) 稲田達夫：ビル解体・地域開発と環境アセスメント，環境アセスメント学会シンポジウム資料，2004.10
- 7) 稲田達夫他：社会ニーズの変化と構造，日本建築学会大会地球環境部門PD資料，2006.09
- 8) 下田吉之他：新しい段階に入った地球温暖化対策と建築の役割，日本建築

学会大会地球環境部門研究協議会資料，2007.08

- 9) 稲田達夫他：地球環境から見たストック性能評価，日本建築学会大会地球環境部門PD資料，2008.09
- 10) 友澤史紀他：循環型社会に向けた建築生産のあり方，日本建築学会大会材料施工部門研究協議会資料，2001.09
- 11) 吉田倬郎他：循環型社会が求める建築の資源循環，日本建築学会大会地球環境部門研究協議会資料，2003.09
- 12) 稲田達夫：真に価値ある社会ストックの整備促進と既存不適格問題，月刊REFORM，テツアドー出版，2006.1
- 13) 第5回大林賞受賞記念シンポジウム資料：建築における地球温暖化対策－IPCCの視点から，大林都市研究振興財団，2008.11
- 14) 漆崎昇他：産業連関表を利用した建築業の環境負荷推定，日本建築学会計画系論文集，第549号，pp.75～82，2001.11
- 15) 稲田泰夫他：地球環境建築・構造からの発信，日本建築学会大会地球環境部門PD資料，2003.09
- 16) 環境省：IPCC第4次報告書概要（公式版），2007.12

（2008年12月10日原稿受理，2009年6月26日採用決定）