

風力発電のライフサイクルにおける環境負荷 評価

町田, 知聡 / MACHIDA, Tomoaki

(発行年 / Year)

2006-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2006-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2005年度 修士論文

風力発電のライフサイクルにおける 環境負荷評価

指導教授 井野博満

大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程
学生証番号 04r1143
マチダ トモアキ
氏名 町田 知聡

もくじ

1 .	緒言.....	3
2 .	環境負荷の指標について.....	5
2-1 .	LCA.....	5
2-2 .	TMR.....	8
3 .	研究対象.....	9
4 .	評価対象.....	11
4-1 .	システムバウンダリー.....	11
4-2 .	製造.....	11
4-3 .	運搬.....	12
4-4 .	建設.....	13
4-5 .	補修.....	13
4-6 .	年間発電量.....	13
4-7 .	製品寿命.....	14
5 .	分解.....	15
5-1 .	分解対象.....	15
5-1-1 .	発電機.....	15
5-1-2 .	制御基盤.....	17
5-1-2-1 .	IC.....	17
5-1-2-2 .	コンデンサー.....	18
5-1-2-3 .	CPU.....	18
5-2 .	実験装置.....	21
5-2-1 .	蛍光X線分析機.....	21
5-2-2 .	プラズマ発光分析機.....	21
5-3 .	分解結果.....	24
5-3-1 .	発電機.....	24
5-3-2 .	制御基盤.....	29
5-3-2-1 .	IC.....	29
5-3-2-2 .	コンデンサー.....	30
5-3-2-3 .	CPU.....	31
6 .	研究結果.....	34
6-1 .	LCA.....	35
6-2 .	LCA と TMR の違い.....	36
6-3 .	発電システムの比較.....	37

7 .	結論.....	39
8 .	参考文献.....	40
9 .	付録.....	41

1 . 緒論

今日、電気は私達の日常生活に欠かすことのできないものである。私たちの生活は電気に依存しているといっても過言ではないのである。そのことを考えると電力について解析するということは非常に有用である。また地球資源の枯渇が危惧される現在において、電力の生産方法自体を見直し、新しいエネルギー源を模索することは重要な問題である。本研究では新エネルギーである風力発電に注目し、多角的に評価していきたい。

環境負荷を評価する代表的な手法にLCA(Life Cycle Assessment)がある。しかしながら LCA には多くの問題が内在している。システム境界設定の任意性や環境インパクトの不確定さなど。これらの問題を解決するため、LCA 以外に TMR(Total Material Requirement)という指標を用いて風力発電を評価していく。

1 1 . 現状

主要国における風力発電システム導入量の推移^[1]を Table.1 に示す。現在日本国内における風力発電の発電導入量は約 800MW。これは原子力発電機約 1 基に相当する電力量である。一方、風力発電の先進国であるドイツでの風力発電の発電量は約 14000MW であり、日本の約 18 倍である。

このように発電量に大きな違いが現れる主要因は風車の設置場所の違いである。日本では陸上発電が主流であるのに対し、ドイツでは洋上発電が主流だからである。洋上発電は陸上発電に比べ安定的な風を得ることが可能である。風を遮る山などがいないためである。また大型風車の騒音被害や生態系への影響を考慮する必要が少なく、陸上発電に比べメリットが大きい。

Table1.主要国における風力発電システム導入量の推移

国名	累積導入量 (MW)												
	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年*	1998年*	1999年**	2000年**	2001年**	2002年**	2003年**
ドイツ	110	175	325	632	1,132	1,552	2,081	2,874	4,442	6,107	8,734	11,968	14,612
スペイン	15	22	52	75	133	249	512	880	1,812	2,863	3,550	5,043	6,420
アメリカ	1,450	1,470	1,550	1,650	1,703	1,715	1,611	2,141	2,445	2,610	4,245	4,674	6,361
デンマーク	409	454	483	537	635	835	1,116	1,420	1,738	2,341	2,456	2,880	3,076
オランダ	83	106	132	154	249	299	329	379	433	473	523	727	938
イギリス	12	50	130	160	200	273	328	338	362	425	525	570	759
イタリア	22	0	0	0	32	70	103	197	277	424	700	806	922
スウェーデン	9	14	30	40	69	103	122	176	220	265	318	372	428
参考)日本	1	3	5	6	9	13	17	32	70	142	357	486	761

現在日本では陸上発電のみである。日本国内には 1000 基ほどの風車が設置されており、風力資源の豊富な場所の多くはすでに設置済みである。今後風力発電の発電量を増やしていくためには風力資源が乏しい場所にも適応する風車の製作・導入、そして洋上発電を行うことが求められている。

2 . 環境影響評価の指標について

2-1 . L C A (Life Cycle Assessment)

LCA は製品の製造から廃棄まで製品のライフサイクルに渡って環境負荷を求める指標である。LCA は ISO14040 シリーズで規格化^[2]されており、内訳は次の通りである。

ISO14040 : LCA の枠組み

ISO14041 : 目的及び調査範囲の設定

ISO14042 : ライフサイクル影響評価

ISO14043 : ライフサイクル解釈

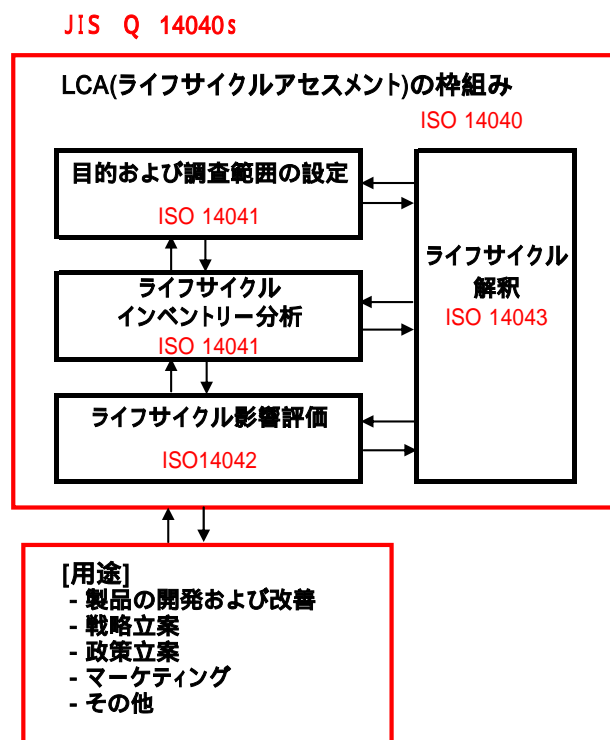


Fig1. System boundary of the present LCA for wind energy production system

Fig1 の ISO14041 から ISO14043 の両矢印は、LCA は常にフィードバックしながら評価を進めていくことをあらわしています。

風力発電や太陽光発電等のクリーンエネルギーの場合、他の発電システムとは違い発電中に環境に影響を及ぼすことがない。しかしながら実際には修理・補修作業による部品の交換があり、環境に影響を及ぼしていると考えられている。これらの部分まで含めて環境影響評価を行っていく。

2-2 . T M R (Total Material Requirement)

T M R とはある製品を作成するのに必要な物質の物質質量、相関与物質質量¹³⁾である。TMR を利用することにより上記で述べた L C M では不十分である部分を補うことができる。

関与物質質量は World resource institute の国際共同報告書「Resource Flows」の中に的確に定義されており、それに基づけば式(1)の記述となる

$$\begin{aligned} (\text{関与物質総量 TMR}) = & (\text{直接投入物質質量}) \\ & + (\text{間接投入物質質量}) \\ & + (\text{隠れた物質フロー量}) \quad (1) \end{aligned}$$

ここで直接投入物質質量および間接投入物質質量は、人間の経済的行為としてそれぞれ直接、間接に投入された物質の量である。これらはまとめて経済フロー (commodity materials flow) とも呼ばれ、様々な経済統計資料などで入手可能な量である。

隠れた物質フローでは資源採掘に伴う岩石や土石の移動も考慮される。このことから TMR では鉱石の品位が低く資源採掘や処理が困難な物質、すなわち、資源生産性の低い希少金属は LCA における評価値に比べより大きな値を示すことになる。

3 . 研究対象

今回研究対象とした風力発電は 1000kW の風車である。風力発電は近年大型化の傾向がみられる。海外における新規導入風車の定格出力は多くが 1000kW 以上^[4]である。2003 年にデンマーク・ドイツ・日本において新規導入風車の定格出力平均を Table 2 に示す。風力発電の先進国であるデンマークでは 2000kW を超え、日本でも 1000kW を超える。以上の事から対象とする風車は 1000kW 以上の大型風車を対象とするのが妥当である。石炭火力、石油火力、LNG 火力、原子力火力、水力、地熱での LCA の値を比較対象として参考とした。

Table2. Comparison of the average new turbine size

	Denmark	Germane	Japan
Average new turbine size	2045kW	1552kW	1180kW

対象とした風車：MWT1000-A^[5]

主な仕様

ウィンドタービン（三菱重工社製）

定格出力：1,000kW カットイン風速：3.0m/s

ロータ直径：61.4m カットアウト風速：25m/s（10分平均風速）

定格回転数：19.8rpm 耐風速：60m/s

定格風速：12.5m/s

発電機

形式：誘導発電機

電圧・相数・周波数

600V × 3 相 × 60Hz

690V × 3 相 × 50Hz

耐久年数 20 年

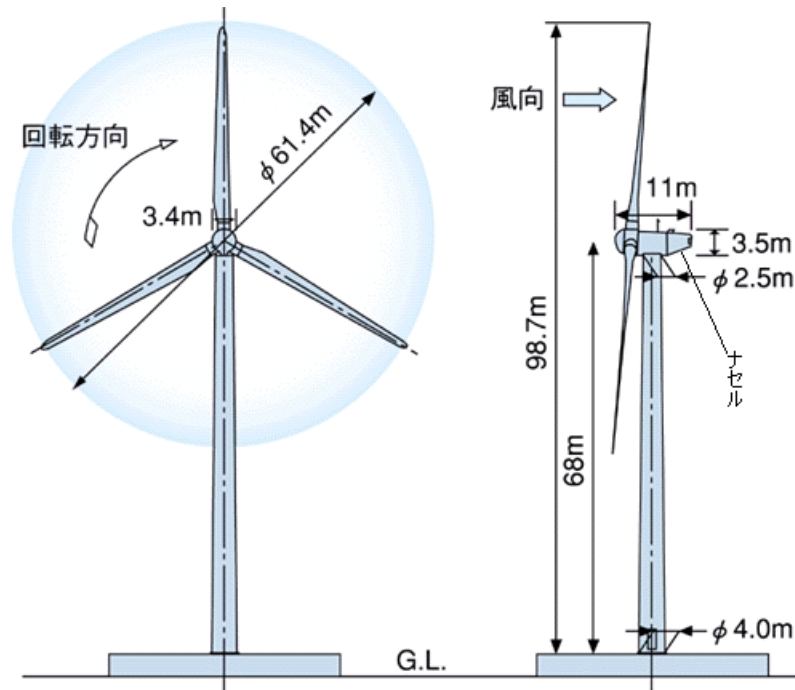


Fig2. illustration of 1000kW class windmill

4 . 評価対象

4-1 . システムバウンダリー

本研究では評価対象を製品の製造 , 運搬 , 運用 , 補修 , を対象とした .
対象範囲を Fig3 に示す .

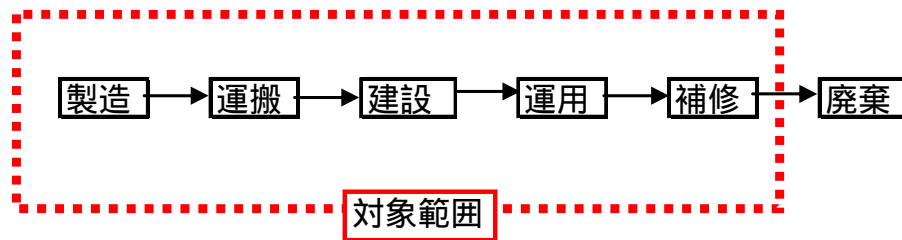


Fig3. System boundary of the present LCA
for wind energy production system

4-2 . 製造

製品製造に必要な素材と素材投入量は (株) 三菱重工の方から教えていただいた。しかしながら、先方よりのお願いでここでは公表は控えさせて頂く。使用とした CO2 排出原単位を Table3 に示す . 製造時に使用される原材料の質量に CO2 排出原単位を掛け合わせて環境負荷を算出した。参考としたインベントリーデータは付録に示す。

Table2. CO2 emission factors of material

	kg-CO2/kg		kg-CO2/kg
GFRP	6.48	ナイロン	3.98
合金鋼	1.25	フェルト	1.93
ゴム	2.65	ベークライト	3.98
ステンレス鋼	1.73	黄銅	1.75
軟鋼	1.25	ポリアミド	3.98
プラスチック	0.91	コンクリート	0.11
塩ビ	1.36	ガラス繊維	1.93
PVC	1.36	ポリエステル	3.85
塩ビライニング	1.36	ビニルエステル	1.36
鋳鉄	2.26	ガラス	1.93
銅	1.75	石油	2.70

4-3．運搬

運搬については文献^[6]を参考にした。輸送にはトラック・鉄道・海運を利用すると仮定した。各設備のそれぞれの移動距離を Table.3 に示す。コンクリートの製造に必要な砂利は現地調達として輸送距離を 50km とする。ほかの素材量・機器等の輸送距離および輸送手段は Table.3 のように設定する。輸送距離から CO₂ 排出量の算出は輸送に必要な石油の量と石油の CO₂ 排出量の原単位を利用した。

Table3. The way and distance of transport of materials and machines

	トラック [km]	鉄道 [km]	海運 [km]
砂利等	50		
セメント等	200		
設備・機械	400	200	200

Table4. Oil consumption unit for each transport system

輸送手段	oil-kg/km
トラック	0.070
鉄道	0.012
海運	0.013

4-4 . 建設

建設については使用した重機等の詳細なデータが得られなかったため文献^[7]を参考にした .

4-5 . 補修

風力発電では使用段階での CO2 排出は無い . しかし , 運用する段階で風車本体を補修しなければならない . 設備補修には土木設備以外の機械設備の製造および輸送に投入された素材および燃料量の 2 % が 1 年間に必要であるとされた . この割合は文献^[6]にならったものである .

4-6 . 年間発電量

年間発電量は 2000MWh とした . 文献^[5]によると年間発電量は 4000MWh である . しかしながらこれはかなりの高効率であり、実際に年間 4000MWh

発電することは難しいと思われる。そこで文献^[7]より年間発電量を
2000MWh とした。

4-7．製品寿命

製品寿命は 20 年とした。

5 . 分解

風車の構成部品を求めていく上で発電機・制御基盤の二点が不明であった。これらの部品の構成部品をより詳しく知るために小型のものを分解し、風車に用いられている部品の類推を行う。

5-1 . 分解対象

小型の発電機、制御基盤を対象にし、分解した。

5-1-1 . 発電機の分解について

対象とした発電機を Pic1 に示す。解体途中の写真をそれぞれ Pic2、Pic3、Pic4 に示す。

対象

- ・ 3PHASE INDUCTION MOTOR
- ・ 0.4kW 4POLES
- ・ YASKAWA ELECTRIC JAPAN
- ・ 重量 8000.8 g



Picture1. The generator



Picture2. Breakup of the generator 1



Picture3. Breakup of the generator2



Picture4. Breakup of the generator3

5-1-2 . 制御基盤

制御基盤の分解は IC チップ・コンデンサー・CPU の解体を行い、その結果から制御盤環境負荷の値を類推した。

5-1-2-1 . IC

対象とした抵抗を Pic5 に示す

対象

・ IC チップ SN74154N,414B,

- ・ MALAYSIA 製
- ・ 重量 3.5 g



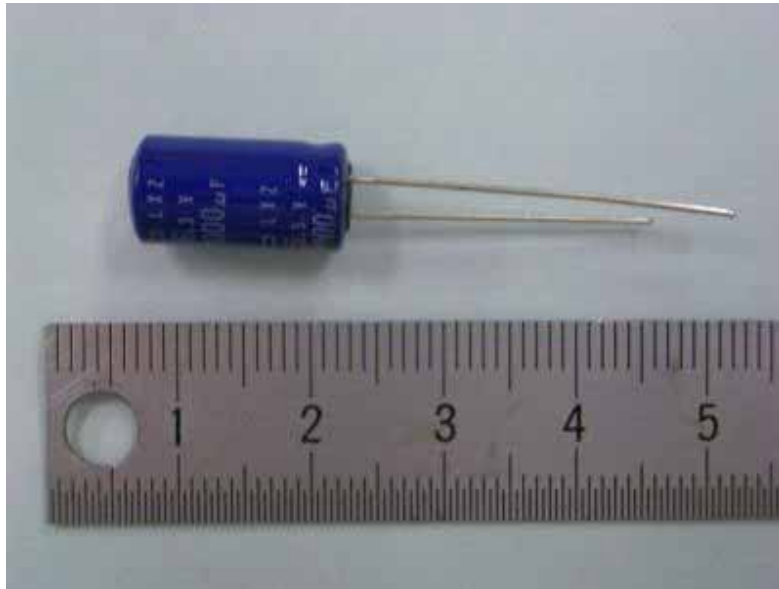
Picture5.The IC tip

5-1-2-2 . コンデンサー

対象としたコンデンサーを Pic6 に示す。解体途中の写真を Pic7 に示す。

対象

- ・ コンデンサー 6.3V 1000 μ F



Picture6. The condenser



Picture7. Breakup of the condenser

5-1-2-3 . CPU

対象とした CPU を Pic8、 Pic9 に示す。

対象

・ 486DX2 intel

・ 重量 22.7g

対象

・ pentium intel

・ 重量 9g



Picture8.Intel 486 DX2



Picture9.Intel Pentium

5-2 . 実験装置

分解をする際に利用した実験装置を以下に示す。

5-2-1. 蛍光 X 線分析機

磁石部品の解析に蛍光 X 線分析装置を利用した。実験装置は XRF-PW2400 を用いた。Table 5 に仕様を示す。

5-2-2. プラズマ発光分析機

制御部品の解析に ICP 発光分析装置を利用した。実験装置は XRF-PW2400 を用いた。Table 6 に仕様を示す。

Table 5 Specifications of X-ray fluorimetry

設備名	一般的な名称	製造メーカー	型式	分類
蛍光 X 線分析システム	蛍光 X 線分析装置(XRF)	オランダ国フィリップス	PW2400	電磁気分析装置
装置の構成		分析の概要		
波長分散型蛍光 X 線分析装置 冷却水循環装置 装置制御・データ処理用 PC1 台		試料の下面より、X 線管から 1 次 X 線を照射し、発生する 2 次 X 線(蛍光 X 線)を分光結晶で分光し、検出器(ガスフロー型、シンチレーション検出器など)によって X 線強度を測定する。光学系の幾何学配置などから理論的 X 線強度を導き、補正定量するファンダメンタル・パラメータ法が利用できる。試料形状は固体、粉体、液体などで、粉体試料の場合はガラスビード試料なども用いられる。多層膜の定量分析ソフトなどアプリケーションソフトも充実している。		
装置の主な仕様		装置の写真		
波長分散型蛍光 X 線分析装置 1. X 線発生部 Rh ターゲット 3kW 2. 対応試料 固体、粉体、液体、ガラスビード、薄膜 3. 検出器 シンチレーション、ガスフロー 4. 測定元素 Be ~ U		 <p>PW2400</p>		

Table 6 Specifications of plasma emission spectrometry

設備名	一般的な名称	製造メーカー	型式	分類
誘導結合プラズマ発光分析装置	ICP 発光分析装置 (ICP-OES)	米国パーキンエルマー	OPTIMA 3300DV	光分析装置
装置の構成		分析の概要		
本装置はアルゴンプラズマ部、試料導入部、分光器およびシステムコントローラ部で構成される。		試料溶液を ICP プラズマ中にネブライザーなどを用いて導入し、プラズマ中で励起された原子が基底状態に戻る時に発する元素特有の波長の光をエッセル分光器で分光し、半導体検出器 (Charge coupled device Detector : CCD)で検出、測定する。		
装置の主な仕様		装置の写真		
<p>1. 分光器</p> <p>受光部：SCD</p> <p>分光器：ポリクロメータ</p> <p>回折格子：エッセル型</p> <p>波長範囲：160～790nm</p> <p>真空：窒素パージシステム</p> <p>2. ICP 部</p> <p>プラズマ制御：コンピュータ</p> <p>プラズマ点火：自動点火</p> <p>周波数：40MHz フリーランニング型</p> <p>ジェネレータ：1500W まで可変</p> <p>トーチ：アルミナ</p> <p>ネブライザー：ロイトン型</p> <p>3. システムコントローラ</p> <p>コンピュータ：DEC/PC</p> <p>4. 電源，サイズ</p> <p>電源：単相 200V-30A</p> <p>サイズ：幅 126cm, 奥行 76cm, 高さ 144cm</p> <p>重量：454kg</p>		 <p>OPTIMA 3300DV</p>		

5-3 分解結果

発電機・制御基盤それぞれを分解した結果を以下に示していく。

分解途中の写真は付録に掲載する。

5-3-1 発電機

発電機の構成部品とその重量を Table7 に示す。構成部品の重量の中で多くを占めているのは、コイルカバー、磁石、電磁石等であることがわかる。

Table7.

名称	重量(g)
羽カバー止めネジ	2.0
羽カバー	215.0
軸カバー止めネジ	47.1
軸カバー止めナット	2.7
軸後部カバー	257.0
軸止め金具	2.3
羽	41.2
羽後部板	258.3
軸止め金具	0.8
軸ベアリング	87.9
コイルカバー	1,438.2
軸	489.0
磁石	1,782.6
磁石の金具	1.9
紐	4.3
コード(銅線部含む)	52.8
銅線	760.2
ビニール	2.1
ビニール	0.4
ビニール	22.4
電磁石(単体)	2,522.7
凝固剤	6.9
合計	7,997.8

構成部品の内、軸・磁石・ベアリング・電磁石については蛍光 X 線分析を行った．その結果を Table8. に示す。



Picture10.Electrical magnet



Picture11.Magnet



Picture12.Bearing

Table 8. Results of analysis about generator

試料	分析元素の含有量 (質量%)									
	Fe	Al	P	S	Ti	Cr	Mn	Zn	Zr	Si
M1 コイルカバー	99.3	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.4	<0.01		
M2 コア鉄心	97.4	0.01	0.02		<0.01	0.06	0.2	<0.01	<0.01	0.1
M3 磁石部	97.9	0.1	0.02	<0.01	<0.01	0.05	0.4	0.02		0.01
M4 磁石かしめ	0.1	98.2	<0.01		<0.01			<0.01	<0.01	1.0
M5 軸	98.1	0.1	0.03	<0.01		0.2	0.8			0.3
M6 ベアリング球	97.7	0.2	0.03		<0.01	1.5	0.3			0.08
	Sn	Cu	V	Mo	Ni					
M1 コイルカバー										
M2 コア鉄心										
M3 磁石部	0.01									
M4 磁石かしめ		0.03								
M5 軸			<0.01							
M6 ベアリング球			<0.01							

解析結果からコイルカバー・コア鉄心・磁石部・ベアリング球は主成分が鉄であり、磁石のかしめ部はアルミであることがわかった。この結果を参考に発電機の環境負荷を求めた。TMR の算出には文献^{[3][8][9]}を参考とした。なお、紐・コード・凝固材は評価対象としなかった。

CO2 排出量ではコイルカバー・磁石など重量が重いものが大きい値を示した。一方 TMR では銅線が大きな値を示した。この理由は銅の TMR 原単位が LCA に比べ大きいためであると考えられる。

Table 9 Results of analysis about generator

名称	重量 (g)	CO2 g	TMR g
羽カバー止めネジ	2.0	2.5	10.2
羽カバー	215.0	268.8	1096.5
軸カバー止めネジ	47.1	58.9	240.2
軸カバー止めナット	2.7	3.4	13.8
軸後部カバー	257.0	321.3	1310.7
軸止め金具	2.3	2.9	11.7
羽	41.2	37.3	428.5
羽後部板	258.3	322.9	1317.3
軸止め金具	0.8	1.0	4.1
軸ベアリング	87.9	109.9	448.3
コイルカバー	1438.2	1797.8	7334.8
軸	489.0	611.3	2493.9
磁石	1759.7	2199.6	8974.5
磁石の金具	1.9	2.4	9.7
紐	4.3	-	-
コード(銅線部含む)	52.8	-	-
銅線	760.2	1326.5	22806.0
ビニール	2.1	2.9	21.8
ビニール	0.4	0.5	4.2
ビニール	22.4	30.6	233.0
電磁石(単体)	2522.7	3153.4	12865.8
凝固剤	6.9	-	-
合計	7974.9	10253.6	264878.9
		CO2 kg	TMR kg
		10.3	264.9

類推

本研究で解体した発電機から 1000kw の風車に使われている発電機の類推を行った。まず 15kw・30kw・55kw・300kw の発電機の寸法を測り、それぞれの体積を求めた。そこから重量そして LCA・TMR の環境負荷の値を類推した。参考にした発電機を Table 10 に示す。

1000kw の発電機は寸法を調べる事ができなかった。そこで 300kW 発電機での発電量と体積の割合を参考にし、体積を 3000.m³ と仮定した。

Table 10 proportional analogy of generator

発電[kW]	直径[mm]	奥行き[mm]	体積[m ³]	重量[kg]	CO2 kg	TMR kg
0.4	150	200	3.5	8.0	10.3	264.9
15	310	400	30.2	68.4	8.8E+01	4.1E+04
30	340	495	44.9	101.8	1.3E+02	6.1E+04
55	400	700	87.9	199.3	2.6E+02	1.2E+05
300	825	1750	935.0	2119.8	2.7E+03	1.3E+06
1000	-	-	3000.0	6801.5	8.7E+03	4.1E+06

5-3-2.制御基盤

5-3-2-1.IC チップ

ICチップの金属部を解析するために、まずICチップを王水で溶かした。沈殿物として残ったものはレジンであり、金属部はすべて溶ける。溶液中に溶けた金属にプラズマ発光分析を行った。分析結果を Table 11 に示す。ICに含まれる金属の主成分は鉄・ニッケル・タングステンであることがわかる。これら3つの元素で全体の94%を占める。また金・水銀が微量ながら含まれていることがわかる。



Picture.16 fusion of IC

Table 11 Results of analysis about IC

試料	分析元素の含有量(参照値mg/100ml)									
	Fe	Mn	Ni	Sn	W	Mg	Al	Ca	Cu	Co
E1 I-SN7415N	204	2.7	185	18	229	0.1	<0.1	0.1	0.3	0.2
	Zn	Zr	Pb	Te	As	B	V	P	Mo	Ti
	1.6	<0.1	12	<0.1	<0.1	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Cr	Rh	Au	Nd	Hg	Cd	Ce	Sc	Sb	Li
	1.2	<0.1	0.2	0.3	含有	<0.1	ND	ND	ND	ND
	La	Ge	Be	Se	Ba	Bi	Pd	In	Ga	Sr
	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

5-3-2-2.コンデンサー

コンデンサーを分解し、金属部分は蛍光X線分析を行った。分析結果をTable 12 に示す。

金属テープ・コンデンサー筐体は構成元素の97%以上がアルミニウムであることがわかる。またリード線は構成元素のほとんどがアルミニウムとスズであることがわかる。

Table 12 Results of analysis about condenser

試料	分析元素の含有量 (参照値mg/100ml)									
	Mg	Al	Si	P	S	Ti	Fe	Cu	Zn	Sn
金属テープ部(グレー)	0.07	99.1	0.03	0.5	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
金属テープ部(赤銅)	0.07	97.4	<0.01	0.7	<0.01	1.6	0.02	<0.01	<0.01	
コンデンサー筐体	0.06	99.0	0.1	0.01	0.02	0.02	0.4	0.08	<0.01	
リード線	0.1	69.4	0.9	0.6	4.0	0.1	1.5	3.1	<0.01	15.0
	Cs	Ba	Cd	Ca	Bi					
金属テープ部(グレー)										
金属テープ部(赤銅)										
コンデンサー筐体										
リード線	0.8	0.9	0.06	0.4	0.1					

5-3-2-3.CPU

CPU をスタンプミルで粉々に粉砕し、金属部分を王水で溶かした。王水で溶かしこんだ液体にプラズマ発光分析を行った。分析結果を Table 13 に示す。



Picture 14 Stamp mill



Picture 15 Stamp mill

Table 13 Results of analysis about CPU

試料	分析元素の含有量 (mg/L)									
	Mg	Al	Ca	Ba	Cu	Co	Fe	Ni	Mn	Sn
e-5-1 486	8	34	14	0.2	93	18	470	460	8	8
e-6-1 Pen	2	39	63	25	1500	260	530	550	3	3
	Zn	Mo	Cr	W	Au	Hg				
e-5-1 486	3	20	6	560	120	16				
e-6-1 Pen	5	<0.1	0.9	530	2	6				
試料	分析元素の含有量 (質量%)									
	Mg	Al	Si	Ca	Cr	Fe	Mo	W	Cu	Br
e-5-2 486 筐体	0.5	74	8	1	3	0.2	2	9	<0.1	<0.1
e-6-2 Pen 筐体	0.3	2	38	16	<0.1	6	<0.1	<0.1	4	25
	Au									
e-5-2 486 筐体	<0.1									
e-6-2 Pen 筐体	1									

Pentium 486 DX2 の金属部では鉄・ニッケル・タングステン・金等が含まれていることがわかる。筐体部分ではアルミニウム・シリコン・タングステンの3つの元素で90%以上を占める。

Pentium の金属部では銅・鉄・ニッケル・タングステンが全体の中で多くを占めていることがわかる。筐体部分ではシリコン・臭素などが多くを占める。

IC・コンデンサー・CPUそれぞれのCO₂排出量^[10]、TMRの値をTable 14に示す。CPUがCO₂排出量、TMRの値共に大きな値を示した。これはCPUに希少金属である金が含まれていたからである。またCO₂排出量に比べTMRの値が桁違いに大きな値である。これは金のTMR原単位^[3]が非常に大きいためである。CPUはPentium 486 DX2がPentium より大きな値を示した。これは重量が大きいこと、Pentium 486 DX2の方が金を大量に含むことなどが主な原因である。

Table 14 Results of analysis about IC & condenser & CPU

名称	重量(g)	CO2 g	TMR g
IC	3.5	3.4	337.4
コンデンサー	1.3	13.1	47.3
CPU 486	22.7	574.7	2.4E+05
CPU Pen	9.0	15.7	1.6E+05

制御基盤の環境負荷の類推

風力発電に用いられている制御基盤の類推を行った結果をtable15に示す。制御基盤に関しては十分なデータが収集できなかった。そこでパソコンに使用されている制御基盤と同じ程度の大きさであると仮定した。IC・コンデンサー・CPUをそれぞれ15個・30個・1個使用されているとし、基盤はベ

ークライトで 500g とした。CPU は環境負荷が大きい Pentium 486 DX2 で
あると仮定した。

TMR の値全体で CPU の占める割合が 95% 以上であることがわかる。
これらの結果を元に風車全体の環境負荷を求めていく。

Table 15 Results of analysis about control system

	個数	CO2 kg	TMR kg
IC	15	0.1	5.1
コンデンサ	35	0.5	1.7
CPU	1	0.5	243.0
基盤	1	2.0	5.2
合計		3.0	254.9

6 . 研究結果

6 - 1 . L C A

風車の製造段階・ライフサイクルにおける LCA 解析 (CO₂ 排出量) を table 12、Fig.4 にそれぞれ示す . ライフサイクル全体における CO₂ 排出量のうち製造段階の占める割合は約 70% である . さらにその製造段階において CO₂ 排出量が最も大きいのはタワー部製造となった .

Table 16 CO2 emission in life cycle of windmill

ライフサイクル		CO2 [t]
製造	ナセル本体	25.4
	発電機器	90.4
	制御器他	1.2
	タワー	245.8
	羽	47.8
	計	410.5
	輸送	25.9
	建設	23.9
	補修	116.9
	合計	577.2

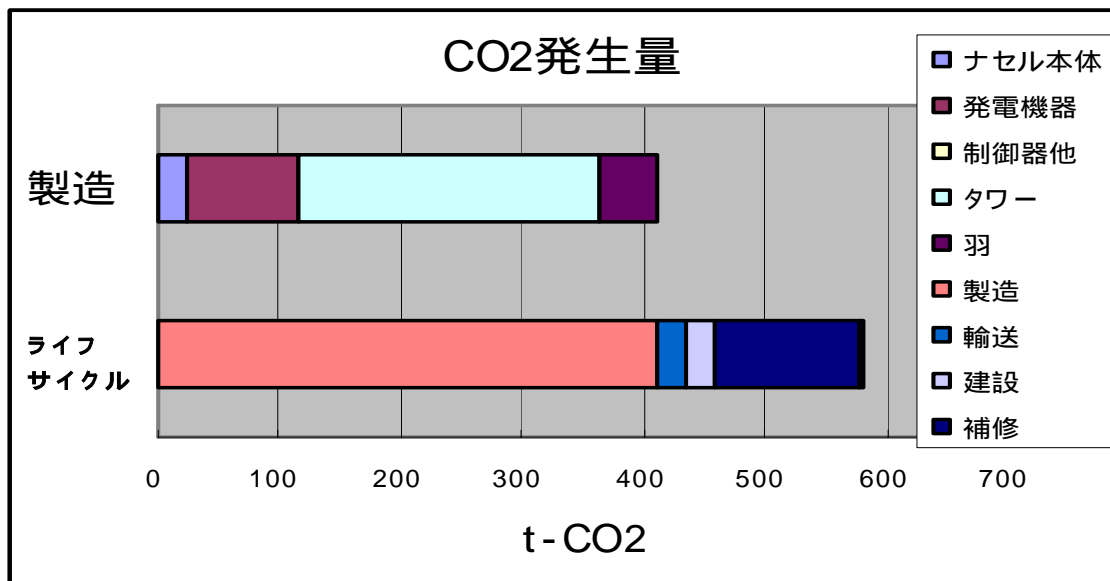


Fig.4 CO2 emission in life cycle of windmill

6 - 2 LCAとTMRの違い

次に風車1基を製造する時の環境負荷についてLCAとTMRの指標による違いをTable 17、Fig.5に示す。TMRではLCAに比べタワー部の占める割合が大きくなった。またナセル本体・羽部の占める割合が小さくなった。これはタワー部製造時に使用するコンクリートのTMR原単位^[9]がLCAと比べ相対的に大きいこと、発電機器部製造時に大量に使用する鉄鋼部品のTMR原単位^[3]がLCAと比べ低いからである。

類推して求めた発電機と制御基盤のCO₂排出量は共に小さな値であった。製造段階全体で発電機は約2%、制御基盤は1%以下である。

Table 17 Comparison of the results of TMR and LCA

	LCA [%]	TMR [%]
ナセル本体	6.2	0.2
発電機器	22.0	12.4
類推部	2.1E-02	1.1E-01
制御器他	0.3	0.0
類推部	7.3E-06	7.0E-06
タワー	59.9	87.0
羽	11.6	0.3
合計	100.0	100.1

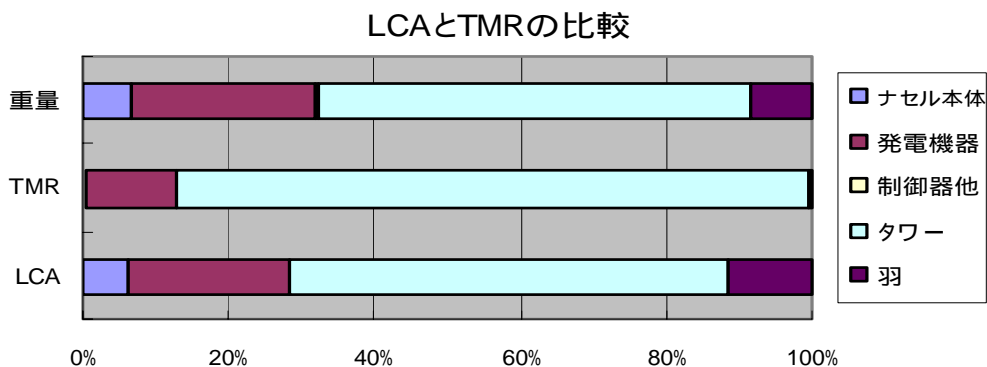


Fig.5 Comparison of the results of TMR and LCA

6 - 3 . 発電システムの比較

風車の発電量あたりの CO₂排出量を他の発電システムおよび発電容量の小さい異なる風車^{[9][11]}と比較した結果を Fig.6 および Fig.7 に示す。

今回研究対象とした 1000kW の風車は約 14g- CO₂/kWh と低い値を示した。Fig.6 より化石燃料発電に比べ小さい値を示した。

Fig.7 は発電量あたりの CO₂ 排出量を比較したものである。風車は大型することにより総発電量が増加する。これにより発電量あたり CO₂ 排出量は減少する。100kW の風車は約 65g- CO₂/kWh、300kW の風車では約 37g- CO₂/kWh、1000kW の風車は約 14g- CO₂/kWh であった。

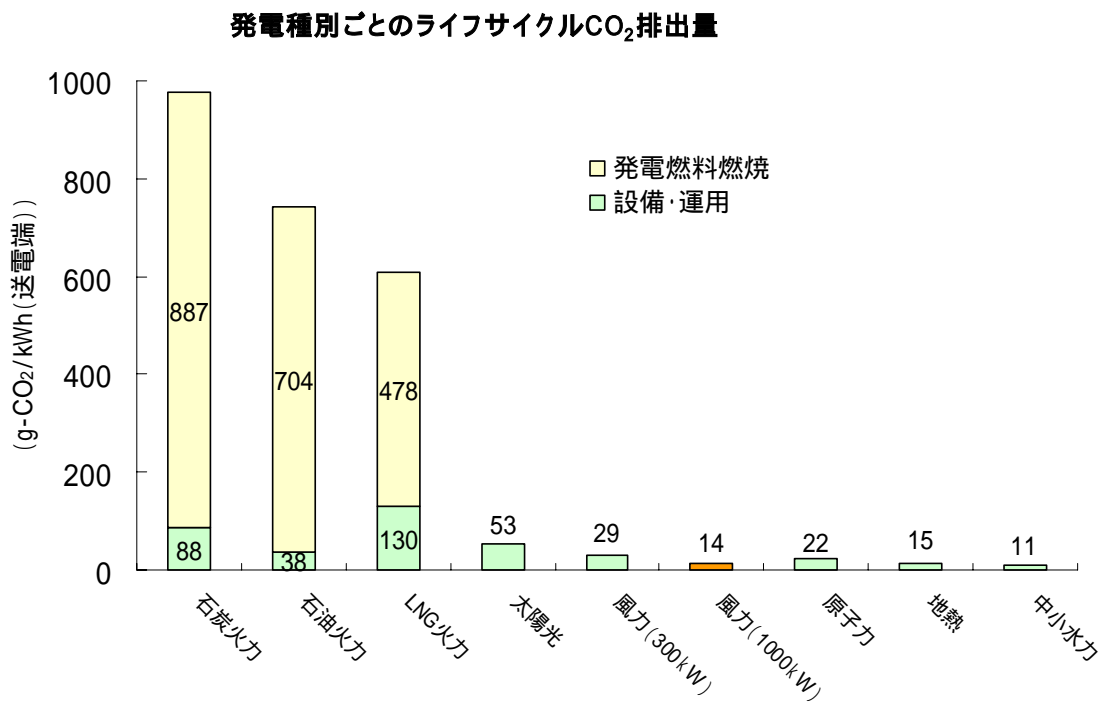


Fig6 Reduction of CO₂ emission by scaling up of windmill

Table 14 CO₂ emission by each power plant

	1000kW級風車 g-CO ₂ /kwh	300kW級風車 g-CO ₂ /kwh	100kW級風車 g-CO ₂ /kwh
素材分	10.3	29.2	50.3
建設分	0.6	1.5	3.5
輸送分	0.6	1.1	3.6
設備補修	2.9	5.5	7.7
合計	14.4	37.3	65.1

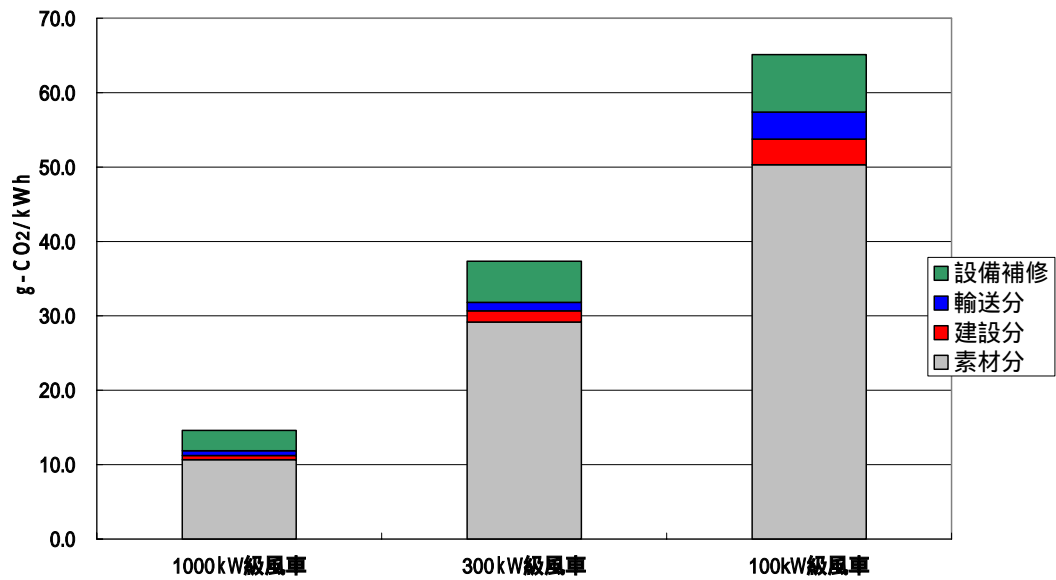


Fig7 CO₂ emission by each power plant

7 . 結論

風車製造段階の環境負荷はタワー部が多くを占めることがわかった .製造段階に占める割合は TMR で約 87% , LCA (CO₂ 排出量) でも約 60% である。

制御機器部に希少金属が含まれていたが ,ごく微量であったため全体に与える影響は小さく、1%以下であった .これらの結果より ,タワー部製造の素材量を減少させることができれば ,環境負荷を低減することができる .

Fig.7 では発電容量が 100kW , 300kW , 1000kW の各風車を発電量あたりの CO₂ 排出量で比較した . 1000kW の風車に比べ 300kW ・ 100kW の風車ではそれぞれ 2 倍 , 4 倍の値を示した .この主な理由は大型化することにより発電量が大きくなったためと思われる .このことより大型化することにより ,環境負荷は小さくなる傾向があることがわかる .

謝辞

研究を進めるにあたり、井野教授、白鳥教授には本当にご丁寧な指導や貴重な御助言を賜りました。また、物質材料研究機構の原田氏、井島氏から貴重な御助言を賜りました。

皆様に心より御礼申し上げます

8 . 参考文献

- [1] European Commission "Wind Energy - The Facts, Volume 5, Market Development", 1999 **BTM Consult ApS, "International Wind Energy Development", March 2001, 2002, 2004
- [2] Japanese Industrial Standards Committee: JIS Q 14040 1997
- [3] 原田幸明 井島清 片桐望 大蔵隆彦：金属の関与物質総量の概算，日本金属学会誌，Vol.65，No. 7 (2001)，564-570
- [4] IEA Wind Energy Annual Report，IEA，pp61，2003，
- [5] 上田悦紀ほか、三菱重工の新 1000kW 風車、MWT-1000A、三菱重工技法 Vol.41 No.1 2004
- [6] 本藤祐樹 内山洋次 森泉芳恵：ライフサイクル CO2 排出量による発電技術の評価，電力中央研究所，pp59,102，2000
- [7] 風力発電導入ガイドブック，独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構，pp25，2005
- [8] 中島謙一，長坂徹夜，原田幸明，井島清：エネルギー資源・工業材料の TMR，CAMP-ISIJ，Vol. 18，p1119，2005
- [9] 石川恵子：Evaluation of the environmental impact from several viewpoints，法政大学大学院卒業論文，2004
- [10] 金属元素の精錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査，独立行政法人物質・材料研究機構エコマテリア研究センター，2003
- [11] 本藤祐樹 内山洋次 森泉芳恵：自然エネルギーと発電技術，科技術庁，pp150，1982

付録

1. LCA の原単位

素材	金属(鉄鋼)	鉄鉄	kg	0.56	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	粗鋼	kg	0.84	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	鍛鋼	kg	3.42	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	鋳鋼	kg	2.26	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	熱延鋼板	kg	1.18	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	普通鋼厚板	kg	1.24	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	普通鋼形鋼	kg	1.25	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	普通鋼棒鋼	kg	1.21	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	普通鋼線材	kg	1.32	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	冷延鋼板	kg	1.52	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	非電気メッキ鋼板	kg	1.94	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	電気メッキ鋼板	kg	1.73	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	溶接鋼管	kg	1.74	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	鍛接鋼管	kg	1.78	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(鉄鋼)	シームレス鋼管	kg	2.04	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	粗銅	kg	0.80	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	電気銅	kg	0.94	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	伸銅品	kg	1.75	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	銅線	kg	1.61	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	アルミニウム	kg	9.11	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	アルミ圧延品	kg	10.25	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	アルミ線	kg	9.79	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	アルミ二次地金	kg	0.28	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	粗鉛	kg	2.38	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	電気鉛	kg	2.52	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	亜鉛	kg	2.32	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	ニッケル	kg	2.71	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	チタン	kg	9.42	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	ズズ	kg	0.90	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	クロム	kg	13.96	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	金属(非鉄)	ニオブ	kg	7.10	未踏科学技術協会	"環境負担評価システム構築のための基礎調査研究,調査報告書	1995.3
素材	合成樹脂	低密度ポリエチレン	kg	1.24	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	エチレン酢酸ビニル樹脂	kg	1.25	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	重鎖状低密度ポリエチレン	kg	0.76	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	高密度ポリエチレン	kg	0.91	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリプロピレン	kg	1.03	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリスチレン(GP)	kg	2.45	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリスチレン(HI)	kg	2.44	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	発泡スチレン	kg	3.01	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ABS樹脂	kg	2.31	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	AS樹脂	kg	2.27	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	アクリロニトリル樹脂	kg	2.43	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	塩化ビニル樹脂	kg	1.36	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	塩化ビニリデン樹脂	kg	1.88	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	MMA樹脂	kg	2.13	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリアミド6	kg	2.97	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリアミド66	kg	3.98	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリアミド12	kg	9.88	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリアセタール	kg	3.98	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリカーボネート	kg	5.08	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリブチレンテレフタレート	kg	3.18	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	ポリエチレンテレフタレート(ボトル)	kg	3.02	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	変性ポリフェニレンエーテル	kg	3.74	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	フェノール樹脂	kg	2.26	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	エポキシ樹脂	kg	3.98	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	軟質ウレタンフォーム(寝具製品)	kg	4.20	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	軟質ウレタンフォーム(自動車部材)	kg	4.38	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	軟質ウレタンフォーム	kg	2.45	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	合成樹脂	不飽和ポリエステル	kg	3.85	化学経済研究所	基礎素材のエネルギー解析調査報告書	1993.9
素材	有機	ナフサ	kg	0.15	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	エチレン	kg	0.77	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	プロピレン	kg	0.77	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	キシレン	kg	1.46	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	ヘキサゲン	kg	1.46	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	ベンゼン	kg	1.46	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	メタノール	kg	0.30	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	酢酸(無水)	kg	1.57	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	有機	水素(電解)	kg	0.56	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	水素(ナフサ水蒸気改質)	kg	12.64	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	苛性ソーダ(電解)	kg	0.56	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	臭化ナトリウム	kg	6.00	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	アンモニア(ナフサ水蒸気改質)	kg	2.53	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	塩素	kg	1.00	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	塩酸(35%)	kg	0.62	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	硫酸(98%)	kg	0.17	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	NaCl(岩塩)	kg	0.10	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	重曹(NaHCO3)	kg	0.10	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	苛性ソーダ(48%)	kg	0.50	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1995.3
素材	無機	ガラス	kg	1.93	NEDO	エネルギー使用合理化手法国際調査	1995.7
素材	無機	セメント	kg	0.80	太平洋セメント	環境報告書	1999
素材	フロン	CFC 11	kg	2.46	NEDO	エネルギー使用合理化手法国際調査	1995.7
素材	フロン	CFC 12	kg	2.46	NEDO	エネルギー使用合理化手法国際調査	1995.7
素材	フロン	HFC-134a	kg	6.61	NEDO	エネルギー使用合理化手法国際調査	1995.7
素材	フロン	HFC-141b	kg	5.18	NEDO	エネルギー使用合理化手法国際調査	1995.7
素材	ゴム	合成ゴム	kg	2.65	NEDO	化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II)	1993.3
素材	紙	段ボール箱	kg	1.76	化学工業日報社	ライフサイクルインベントリー分析の手引き	1998.9
素材	紙	コピー用紙	kg	2.62	リコー	「コピー用紙のLCA」	1997
素材	木	木材チップ(日本)	kg	0.65	化学工業日報社	ライフサイクルインベントリー分析の手引き	1998.9
素材	木	木材チップ(外国)	kg	0.033	化学工業日報社	ライフサイクルインベントリー分析の手引き	1998.9
素材	木	原木(日本)	kg	0.00076	化学工業日報社	ライフサイクルインベントリー分析の手引き	1998.9
素材	木	原木(外国)	kg	0.00076	化学工業日報社	ライフサイクルインベントリー分析の手引き	1998.9

2 . TMR の原単位

	ore-TMRa)[t/metal-t]			ore-TMRa)[t/metal-t]
Au	1,800,000.00		B	4,300.00
Cu	300		Li	1,400.00
Fe	5.1		Tb	30,000.00
Ag	160,000.00		Gd	10,000.00
U	11,000.00		Ru	800,000.00
Bi	150,000.00		Si	4.5
Zn	43		Sn	43
Pd	1,800,000.00		Zr	540
Pb	95		Ir	2,400,000.00
Pt	1,400,000.00		Y	2,700.00
Ni	200		Ta	12,000.00
Al	10		Dy	9,000.00
Mo	2,000.00		Mg	20
Sr	500		W	170
Cr	8.9		Lu	45,000.00
Ce	2,000.00		Br	9,40.0
V	1,500.00		Hg	2,000.00
Rh	2,600,000.00		Er	120,000
Mn	8		Tm	40,000.00
La	2,000.00		Ho	25,000.00
In	200,000.00		Eu	20,000.00
Nd	3,000.00		Se	1,000.00
Cd	2,000.00		Hf	10,000.00
Te	270,000.00		As	29
Nb	1,400.00		Re	20,000.00
Co	870		Be	2,400.00
Pr	8,000.00		Ga	3,000.00
Sb	200		Ge	8,300.00
Yb	12,000.00		Th	9,000.00
Sm	9,000.00		Ti	6.3
			Os	2,000,000.00

	ore-TMRa)[t/metal-t]
コンクリート	43.5