

LCA 的視点からみた鉄鋼製品の社会における 省エネルギー貢献に係る調査¹

各論 5 . 変圧器 (方向性電磁鋼板)

第二研究部環境グループ 主任研究員 太田 完治
(現、三菱電機株式会社環境保護推進部推進グループ)

5.1 変圧器用方向性電磁鋼板の使用動向

明治の幕開け (1868) と、世界の交流電気文化の始動 (水力発電所の始動 : 1878、白熱電球の発明 : 1879、変圧器の発明 : 1885、交流発電機 1887) とは、ほぼ同時期であった。日本に白熱電燈が移入 (1883) されて以降の電燈照明用電力需要の伸び、それに続く路面電車用動力や工業用動力での電力需要の伸びに伴い、戦前までは発電運転コストの安い『水力』に一次エネルギー源が求められ、水力発電所が次々と建設された。更なる需要の伸びに応えるため、新規開拓の水力発電所は需要地から更に遠い山間部へ立地を求めざるを得なかった。遠距離の電力輸送に、送電損失を低減すべく送電電圧の高電圧化が求められた。発電所での昇圧、需要地での降圧に変圧器が必要であった^{1,2)}。

送電損失を低減するため、当初、変圧器や電線等の電力輸送機器に求められたものは電気絶縁性能であった。即ち、「如何に、高電圧にできるか？」が大きな問題であった。1960 年代にソビエトで 500kV 送電の技術が確立し (表 5.1)、送電損失低減における次の課題は、変圧器の電圧変換における損失低減になった。

表 5.1 世界での送電電圧 (最高電圧) の推移

年代	送電電圧 (kV)
1900年前	10 ~ 15, 22
1900年代	50
1910年代	100
1920年代	150
1930年代	220
1940年代	270
1950年代	400
1960年代	500

(出所) 山崎俊雄、木本忠昭、「新版 電気の技術史」 直川一也、「科学技術史 電気・電子技術の発展」

¹ 本報告は平成 13 年度に社団法人 日本鉄鋼連盟より受託して実施した受託研究の一部である。この度、社団法人 日本鉄鋼連盟の許可を得て公表できることとなった。社団法人 日本鉄鋼連盟関係者のご理解・ご協力に謝意を表すものである。

変圧器の損失には、2次側（負荷側）に電力負荷を掛けた場合に発生する負荷損失と、2次側に電力負荷が無い場合でも発生する無負荷損失（鉄損²とも言う）とがある（表5.2）³。従って、送電時の変圧器損失を改善するには、先ずこの無負荷損失を低減させる必要がある。

表5.2 変圧器の電力損失

変圧器 本体損失	無負荷損(14%) (=通称「鉄損」) 2次側の負荷無し	ヒステリシス損 $P_h = h \cdot f \cdot B_m^n$ P_h : ヒステリシス損(W/kg) h : 鋼板材料により定まる定数 f : 通電電流の周波数(Hz) B_m : 磁束密度の最大値(T) n : スティンメツ定数(=2~3)		鉄心の1次側に 直流を通電した場合の ヒステリシス損	7%
		渦電流損 $P_e = e \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2$ P_e : 渦電流損(W/kg) e : 鋼板材料の電気抵抗率 で定まる定数 t : 鋼板の板厚 f : 通電電流の周波数(Hz) B_m : 磁束密度の最大値(T)		鉄心の1次側に 交流を通電した場合の ヒステリシス損から 上記の直流通電時の ヒステリシス損を 引いた残り	7%
	負荷損(86%) (=通称「銅損」) 2次側の負荷有り	巻線の抵抗損	巻線通電に伴う電気抵抗損		64%
	漂遊損	巻線内渦電流損	漏れ磁束が巻線に 誘導する渦電流損		12%
		その他の漂遊損	漏れ磁束が上記以外の金属 に誘導する渦電流損		10%

注1. 鋼板材料の性質（物性、製品条件）に起因する変圧器の損失は、無負荷損であり、このデータは、製品出荷時に鋼板メーカーが添付（或いはカタログ値）するものである。

注2. 無負荷損のヒステリシス損と渦電流損は、経験的に無負荷損の半分ずつである³。従って、無負荷損の渦電流損が下がれば、ヒステリシス損も小さくなる。無負荷損を下げるには、鋼材物性値 h 、 e を改善するだけでなく、鋼板の板厚 t を薄く加工することも重要である。

（出所）変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

無負荷損失を決める要因には、鉄心材料の磁気特性（高磁気特性であれば、少ない鋼材で多くの電力を変換できる）、鉄心鋼板の厚さ（薄い程、渦電流損失を下げるができる）、鉄心材料の電気抵抗（電気抵抗が大きいほど渦電流損失を小さくできる）、鉄心鋼板の加工性（打抜き切断時のバリ高さが小さい程、積層時の板間距離を小さくでき、鋼板の

² 電気機器としては、負荷損失、無負荷損失が一般的である。一方、変圧器の場合、有負荷時の通電で発生する変圧器損失電力を銅損と言う。しかし、無負荷時でも一次側コイルには通電されており電力損失が発生する。これを銅損に比して鉄損という。本誌では、変圧器を電気機器として扱う場合には「無負荷損」、材料等鉄鋼製品として扱う場合には「鉄損」の併用を行う。

空間占有率を上げられ、漏れ磁束を減らすことができる)等がある。これらの因子の中で、無負荷損の低減に大きく寄与するのが鉄心材料の磁気特性の改善である(表5.3)。

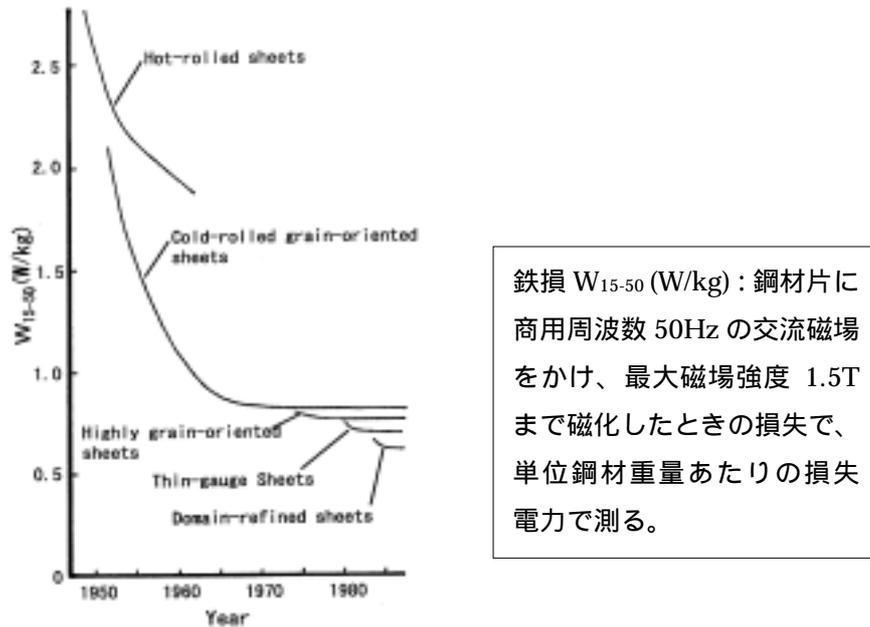
鉄心材料に珪素鋼を用いれば磁気特性がよくなる(珪素鋼は透磁率が大きく、鋼材内の磁束密度が大きくなる。この性質の為、珪素鋼のことを電磁鋼と呼ぶ。)ことは1900年に発見された。1903年にこの珪素鋼(当時は熱間圧延加工である。以降、電磁鋼板と言う)を用いた変圧器が世界ではじめて生産され、変圧器の性能が飛躍的に向上した¹⁾。電磁鋼板は、その後冷間圧延加工へと進み、更に加工方法に改良が加えられ、種々の特性が飛躍的に改善されて行く(図5.1)⁴⁾。即ち、加工性(寸法精度、形状、占積率)や磁気特性(高磁束密度かつ低鉄損)に優れた電磁鋼板が得られるようになった。

表5.3 無負荷損低減方策の推移

年代	材料	設計・構造	作業管理
1970年代	・鉄心材料の改善	・額縁接合の採用 ・バインド締付方式の採用 ・鉄心占積率の向上	・鉄心起立装置の使用 ・組立方法の改善
1980年代	・鉄心材料の改善 ・薄珪素鋼板の使用	・締付構造の改善 ・絶縁構造合理化による小型化 ・鉄心占積率の向上 ・接合方式の改善 ・巻線並列数(鉄心脚数)の低減(500kV)	・組立方式の改善
1990年代以降	・鉄心材料の改善 ・薄珪素鋼板の使用	・絶縁構造合理化による小型化 ・鉄心占積率の向上 ・接合方式の改善 ・磁束密度の低減	・組立方式の改善

(出所) 変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

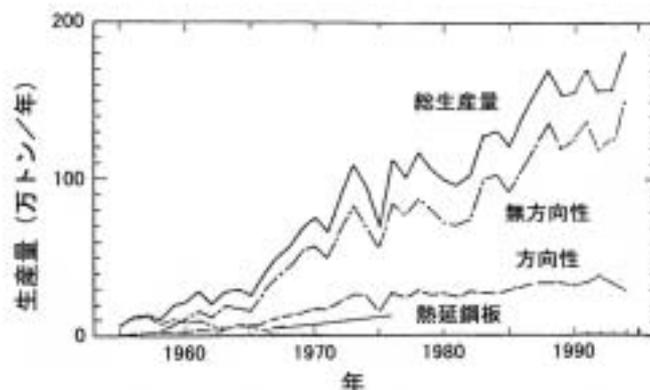
図 5.1 方向性電磁鋼板の製造方法による鉄損低減推移



(出所) (社)日本鉄鋼連盟、「LCA的視点からみた鉄鋼製品利用のエネルギー評価調査」

電磁鋼板には、方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板があり、前者は常に一定方向（正負はある）に磁化して使われる変圧器の鉄心、後者は磁化される方向が絶えず変わるモーターや発電機の回転子等に使用されている。両者とも鉄の磁化されやすい性質を制御して製造されている。特に方向性電磁鋼板の場合、この性質を鋼板の特定方向にすべて揃えるという極めて高度な技術を利用している。我が国の電磁鋼板の生産量は、電力産業、電機産業の発展とともに増加し、現在では質・量ともに世界第一位の地位にある（図 5.2）。更に、技術開発も日本が世界をリードしており、世界中の電磁鋼板メーカーに技術供与・技術指導を通じて貢献している。

図 5.2 電磁鋼板生産量推移



(出所) (社)日本鉄鋼連盟、「LCA的視点からみた鉄鋼製品利用のエネルギー評価調査」

5.2 変圧器の変遷

変圧器の使用年数を表 5.4 に示す⁶⁾。変圧器は、モーターの様な回転や摺動部分が無く、照明機器のフィラメントの様な消耗部品も無い為、一般に長寿命機器である。特に変圧器の絶縁性能の年次劣化は著しく改善され、昨今では 30 年以上使用されている変圧器が 1 割を超えるようになってきている。今回の評価にあたり、変圧器の平均寿命を 30 年とした。代表的な変圧器の定格と用途を表 5.5 に示す。

代表的な変圧器の電圧と単位容量あたりの無負荷損の関係を表 5.6 に、変圧器の高圧側電圧と変圧器の単位容量あたりの電力損失を図 5.3 に示す。表 5.7 の代表的な変圧器の仕様で、高圧側電圧と単位容量あたりの全電力損失を図 5.3 の様に片対数グラフにプロットすると、単位容量あたりの全電力損失は直線に載り、無負荷損も一つのカーブに載ることが分かった。そこで、容量の小さい(高圧側電圧が低い)変圧器についての単位容量あたりの電力損失も、このグラフから読取り、表 5.6 を補完作成した。

表 5.4 変圧器の経年数

経年 年	1997年 %	1991年 %	1982年 %
0-1	4	4	4
2-6	17	17	20
7-11	15	10	25
12-16	9	18	19
17-21	17	19	16
22-26	17	16	8
27-31	12	10	4
32-	9	6	4
合計	100	100	100
22年以上使用して いるものの割合	38	32	16
平均使用年数(年)	17.7	17.0	13.7

注：電気事業会計法令によれば、汽力発電設備における変圧器の耐用年数は15年。
配電用柱上変圧器の耐用年数は18年。
電気事業送配電用の変電設備耐用年数は22年。

(出所) 変電設備点検合理化専門委員会、「変電設備の点検合理化」、
電気協同研究、第 56 巻(平成 12 年)、第 2 号

表 5.5 代表的な変圧器の定格（電圧、容量）とその用途

電圧 kV	定格容量 MVA	電流(定格容量/電圧) kA	用途
500	1000	2.00	発電機からの昇圧、超高压送電
275	300	1.09	発電機からの昇圧、高压送電
154	200	1.30	送電
66	20	0.30	送電
22	1	0.05	受電（大口契約用）
6.6	0.02	0.003	配電、受電（小口契約、事業用等）

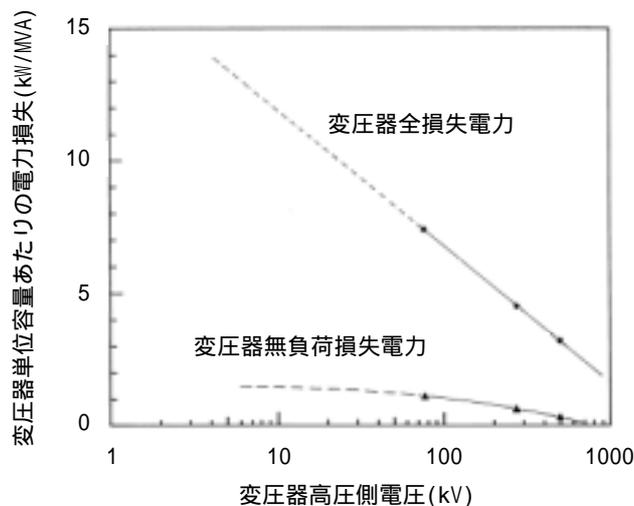
（出所）変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号、他

表 5.6 代表的な変圧器の容量と無負荷損の関係

変圧器の分類 電圧(高压/低压) (kV/kV)	定格容量 (MVA)	容量当りの変 圧器全損失電力 (kW/MVA)	単位容量当りの 無負荷損失電力 (kW/MVA)
500/275	1,000	3.2	0.3
275/77	300	4.5	0.6
77/6	20	7.4	1.1
154/66	200	5.8*	0.9*
6.6/0.11	0.02	13*	1.5*

注：*の付いた値は単位容量あたりの電力損失グラフ（図5-3）より読取った
 （出所）変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

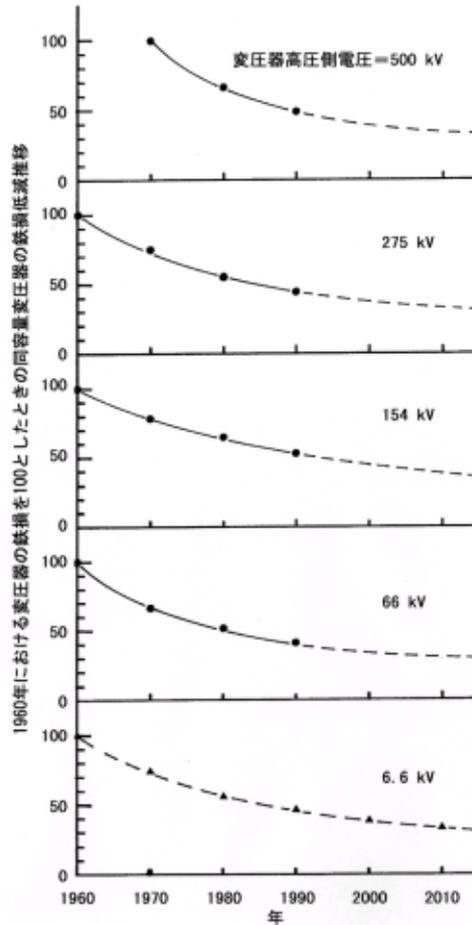
図 5.3 変圧器の高压側電圧と変圧器の単位容量あたりの電力損失



（出所）変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

一方、変圧器容量を固定した場合の無負荷損の年次推移を図5.4に示す。表5.6及び、図5.4より、時代とともに低減した単位容量あたりの無負荷損を、変圧器容量毎に示す(表5.7)。

図5.4 同容量の変圧器における無負荷損低減の年次推移



(注) 実績値、-----は外挿カーブ、--- ---は外挿カーブからの読取り値を示す。
 (出所) 変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

表5.7 単位容量あたりの無負荷損の低減推移 (kW/MVA)

年		1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010
電圧 kV	定格容量 MVA	単位容量あたりの無負荷損 kW/MVA										
		500	1,000	-	-	0.45	0.35	0.30	0.26	0.22	0.20	0.18
275	300	1.09	0.92	0.82	0.69	0.60	0.55	0.49	0.44	0.41	0.38	0.36
154	200	1.38	1.22	1.09	0.97	0.90	0.80	0.73	0.68	0.62	0.57	0.53
66	20	2.12	1.69	1.42	1.23	1.10	0.95	0.89	0.80	0.74	0.70	0.63
6.6	0.02	2.62	2.20	1.93	1.70	1.50	1.33	1.22	1.13	1.03	0.92	0.88

注 1980年の単位容量あたりの無負荷損が、高圧側の電圧の関数として与えられている(図5-3)。
 その他の年の値は、1980年の値をベースに無負荷損の年推移(図5-4)を考慮して求めた。

(出所) 変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率運転」、電気協同研究、第40巻(昭和59年)、第4号

次に、変圧器にどれくらいの電磁鋼板が使われているかを表5.8、図5.5に示す。変圧器単位容量あたりの重量を縦軸に、横軸に変圧器容量を片対数目盛でプロットすると、ほぼ一つの曲線に載ることが分かった。変圧器容量が小さくなるほど、単位容量あたりの変圧器重量は増える。変圧器に使用される鋼材は、容器や支持構造部の普通鋼材と鉄心の電磁鋼板に分かれる。変圧器容量の小さい柱上トランスでは、鉄心に用いられる電磁鋼板の重量割合は、全重量の35%であるが、配電用では28%になる。送電用の場合は、電磁鋼板と普通鋼使用割合を、配電用と同様の1:1を採用し、31%:31%とした。

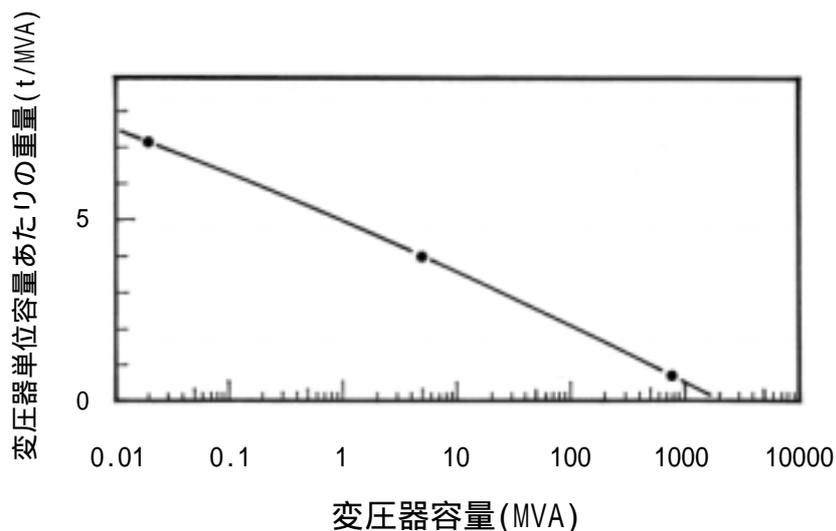
表5.8 変圧器における電磁鋼の使用重量比率

	高次側電圧	容量 MVA	重量 t	単位容量 あたりの 重量 t/MVA	鋼材 使用量 (重量比) %	電磁鋼板 使用量 (鉄心) %	普通鋼 使用量 (容器等) %
柱上変圧器	6.6kV	0.02	0.143	7.15	57	35	22
配電用変圧器	66.0kV	5	20	4.00	56	28	28
送電用変圧器	500kV~154.0kV	100~300			62	31*	31*
例：発電所用	500kV(昇圧用)	784	550	0.70			

注 *の付いた値は、配電用変圧器の1:1を採用した。

(出所) (社)日本電機工業会、「銑配電機器リサイクルの現状と動向、今後の課題に関する報告書」(社)電気協同研究会他、「21世紀変電技術 - サブステーションからマルチステーションへ - 」

図5.5 変圧器の大きさ(容量)と単位容量あたりの変圧器重量



(出所) (社)日本電機工業会、「銑配電機器リサイクルの現状と動向、今後の課題に関する報告書」(社)電気協同研究会他、「21世紀変電技術 - サブステーションからマルチステーションへ - 」他

5.3 電磁鋼板の高機能化による省エネルギー貢献評価の準備

表 5.9 に変圧器の分類と用途（表 5.5）及び無負荷損失（表 5.7）を一覧に整理する。
品目の分類は、経済産業省の機械統計年報による。

表 5.9 変圧器の容量と用途分類

品目名	用途	高压側 電圧 (kV)	単位容量当りの無負荷損失 (kW/MVA)											
			1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	
変圧器														
標準変圧器														
電力会社向	*1 柱上変圧器	6.6	2.62	2.20	1.93	1.70	1.50	1.33	1.22	1.13	1.03	0.92	0.88	
電力会社向以外	*2 小口高压/業務	6.6	2.62	2.20	1.93	1.70	1.50	1.33	1.22	1.13	1.03	0.92	0.88	
非標準変圧器														
油入り変圧器														
1千kVA未満	*3 大口	66.0	2.12	1.69	1.42	1.23	1.10	0.95	0.89	0.80	0.74	0.70	0.63	
1千以上3千kVA未満	*3 大口	66.0	2.12	1.69	1.42	1.23	1.10	0.95	0.89	0.80	0.74	0.70	0.63	
3千以上1万kVA未満	*3 大口	66.0	2.12	1.69	1.42	1.23	1.10	0.95	0.89	0.80	0.74	0.70	0.63	
1万以上10万kVA未満	*4 送電	66.0	2.12	1.69	1.42	1.23	1.10	0.95	0.89	0.80	0.74	0.70	0.63	
10万kVA以上	*4 送電	275.0	1.09	0.92	0.82	0.69	0.60	0.55	0.49	0.44	0.41	0.38	0.36	
乾式変圧器														
モールド変圧器	*5 小口高压/業務	6.6	2.62	2.20	1.93	1.70	1.50	1.33	1.22	1.13	1.03	0.92	0.88	
その他の乾式変圧器	*6 小口高压/業務	6.6	2.62	2.20	1.93	1.70	1.50	1.33	1.22	1.13	1.03	0.92	0.88	

- *1 電力会社向けで、かつ1台当りの平均容量が20kVAであるので、柱上変圧器と判断できる。
- *2 1台当りの平均容量が120kVAであり、電力需要分類で小口高压の需要家に相当する。
トランスの扱いとしては、柱上トランスの容量の6倍なので、高压側6.6kVとみなせる。
- *3 1,000kVA～10,000kVAの需要家は、工場などの大口契約者である。
2万kVAのトランスで代表させる。
- *4 10,000kVA以上の用途は、送電用である。
電圧には500kV、275kV、154kVとあるが、ここでは、平均として275kVのトランスと見なす。
- *5 乾式であり、ビルの受電/ビル内の配電に向いている。
系統から6.6kVで受ける。
- *6 容量が柱上トランスとほぼ同じなので、6.6kVで受ける。

次に、変圧器の使用時間についてであるが、電力会社の送配電用は、1年あたり8,760時間フル稼働であるとした。一方、需要家側の稼働時間は、例えば、大口需要家には、工場などがあり、その平均的な稼働時間は電気事業便覧の需給統計から類推できる（表 5.10）。2005年、2010年に関しては、外挿して求めた。

電気需要サイドで電気を使った場合（電気使用端と言う）単位電力量の消費で発電時にどれくらいのCO₂を発生しているかを図 5.6 に示す。この数値は、全国10電力会社の燃料、発電効率、発電量で平均化されている。

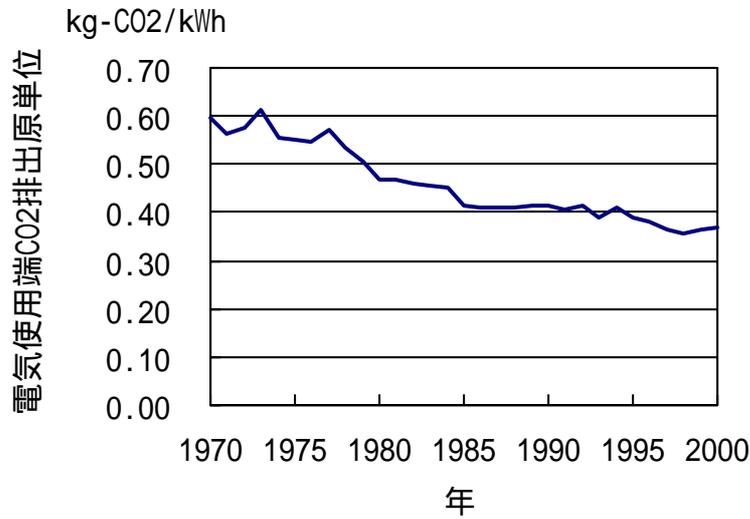
電磁鋼板に関する省エネルギーとCO₂排出のデータを表 5.11 に整理した。

表 5.10 電力需要家との契約及び電力使用量 (10 電力会社)

	1990	1995	2000	2005	2010
契約口数(口)					
業務用電力	327,163	397,554	438,481	450,000	450,000
小口・高圧電力用	249,139	268,999	271,115	271,000	271,000
大口・合計	22,985	25,439	20,418	24,000	24,000
事業用電力	60,159	90,168	95,672	95,000	95,000
契約電力(kW)					
業務用電力	49,296,685	59,500,482	56,713,157	59,700,000	59,700,000
小口・高圧電力用	28,629,483	30,577,198	29,502,425	29,000,000	29,000,000
大口・合計	62,467,526	69,154,226	20,753,521	45,700,000	45,700,000
事業用電力	454,983	688,392	556,957	500,000	500,000
使用電力量(1,000kWh)					
業務用電力	116,339,269	152,819,403	157,930,446	196,000,000	233,000,000
小口・高圧電力用	62,894,340	67,177,954	72,230,513	74,700,000	77,200,000
大口・合計	248,100,849	254,736,846	74,798,316	164,520,000	164,520,000
事業用電力	996,101	1,291,809	1,061,049	1,200,000	1,200,000
1契約当たりの平均電力(kW/口)					
業務用電力	150.7	149.7	129.3	132.7	132.7
小口・高圧電力用	114.9	113.7	108.8	107.0	107.0
大口・合計	2,717.8	2,718.4	1,016.4	1,904.2	1,904.2
事業用電力	7.6	7.6	5.8	5.3	5.3
1契約当たりの平均使用電力量(kWh/口)					
業務用電力	355.6	384.4	360.2	435.6	517.8
小口・高圧電力用	252.4	249.7	266.4	275.6	284.9
大口・合計	10,794.0	10,013.6	3,663.4	6,855.0	6,855.0
事業用電力	16.6	14.3	11.1	12.6	12.6
稼働時間(h)					
業務用電力	2,360.0	2,568.4	2,784.7	3,283.1	3,902.8
小口・高圧電力用	2,196.8	2,197.0	2,448.3	2,575.9	2,662.1
大口・合計	3,971.7	3,683.6	3,604.1	3,600.0	3,600.0
事業用電力	2,189.3	1,876.6	1,905.1	2,400.0	2,400.0
大口合計以外の合計	2,299.4	2,438.0	2,664.7	3,048.2	3,491.0

(出所) (社)日本電気協会、「電気事業便覧」

図 5.6 需要家が電力を使用する場合の CO2 排出原単位



(出所) 電気事業連合会 Web サイト

表 5.11 電磁鋼板と鉄鋼関係の省エネルギーと CO2 排出データ

	1990	1995	2000	2005	2010	
鉄鋼データ						
a. エネルギー消費量 (高位発熱量)	PJ	2,475	2,387	2,330	2,279	2,228
b. CO2排出量	kt-CO2	194,589	185,924	181,142	179,109	177,076
c. 電磁鋼板生産エネルギー消費原単位	MJ/kg	38.92	38.92	38.92	38.92	38.92
換算データ						
d. エネルギー消費量 a × 0.95: 低位発熱量へ換算	PJ	2,351	2,268	2,214	2,165	2,117
e. CO2排出係数 (=b/d)	t-CO2/TJ	82.76	81.99	81.84	82.73	83.66
電気データ (図5-6より)						
f. 電気使用端CO2排出原単位	kg-CO2/kWh	0.42	0.39	0.37	0.37	0.37

(出所) (社)日本鉄鋼連盟調べ

最後に、変圧器生産量に関する統計を表 5.12 に示す。1960 年頃の分類は現在と異なるため、電力会社向けと需要家向け、標準変圧器と非標準変圧器に整理し直した。特に、1955 年～1981 年の二重枠内は、1987 年～2000 年の累計生産実績から比例配分して求めている。2001 年以降は、生産量を外挿して求めた。

表 5.12 生産された変圧器の分類

年	電力会社向け				一般向け			
	大容量変圧器		標準容量相当変圧器		大容量変圧器		標準容量相当変圧器	
	送電用		配電用		大口契約		業務用、小口高圧用等	
	数(台)	容量(MVA)	数(台)	容量(MVA)	数(台)	容量(MVA)	数(台)	容量(MVA)
1955	113	4,636	92,896	517	5,634	881	41,184	920
1956	194	4,847	161,911	905	9,677	920	71,779	1,612
1957	266	7,776	172,221	1,272	13,245	1,477	76,350	2,264
1958	219	9,095	111,747	851	10,918	1,727	49,540	1,514
1959	300	9,539	209,619	1,665	14,904	1,812	92,929	2,965
1960	427	15,765	237,151	2,304	21,254	2,994	105,135	4,101
1961	539	20,773	261,109	2,721	26,822	3,945	115,756	4,843
1962	528	23,162	180,270	1,988	26,258	4,399	79,918	3,538
1963	515	20,118	167,061	1,913	25,606	3,821	74,062	3,406
1964	717	18,470	216,325	2,671	35,652	3,508	95,902	4,755
1965	671	24,357	206,447	2,315	31,113	7,891	91,523	4,120
1966	597	22,392	207,239	2,407	31,296	7,736	91,875	4,285
1967	679	27,372	256,951	3,298	37,195	10,150	113,913	5,871
1968	885	33,135	260,188	3,754	66,875	14,460	115,348	6,683
1969	1,133	46,267	246,052	3,994	69,357	15,483	109,081	7,110
1970	1,495	60,762	281,780	4,767	65,950	18,488	124,921	8,486
1971	1,312	57,371	291,036	4,693	53,698	16,288	129,024	8,355
1972	1,017	49,549	324,877	5,303	45,008	14,160	144,027	9,411
1973	1,319	66,787	411,143	7,155	44,531	18,037	182,271	12,738
1974	1,265	61,394	337,830	6,705	43,171	19,899	149,769	11,935
1975	822	44,763	217,131	3,282	39,124	11,341	96,260	5,843
1976	931	52,756	313,093	5,124	40,652	12,228	138,802	9,123
1977	1,155	70,126	335,084	6,242	59,724	13,340	148,552	11,113
1978	1,394	84,677	377,617	7,491	61,946	14,466	167,407	13,335
1979	1,203	79,047	373,543	7,989	37,535	13,606	165,601	14,222
1980	1,545	94,783	322,994	6,975	54,541	16,936	143,192	12,417
1981	1,487	87,140	316,612	6,629	44,535	15,128	140,362	11,802
1982	1,263	84,512	265,911	5,924	35,171	13,267	117,885	9,308
1983	992	64,812	255,484	5,115	45,516	11,505	113,263	8,687
1984	1,155	66,727	293,169	5,932	48,740	12,414	129,969	10,767
1985	1,187	72,652	298,454	6,197	48,910	13,045	132,313	11,954
1986	1,098	76,213	354,708	8,592	63,257	13,190	157,251	11,232
1987	1,159	62,748	375,137	8,692	45,676	11,711	151,203	11,759
1988	1,041	66,255	403,726	9,827	40,333	12,271	168,851	14,590
1989	1,051	51,022	409,478	10,554	40,830	12,712	183,808	16,262
1990	1,199	66,243	497,704	13,342	49,042	14,417	192,365	19,601
1991	1,382	71,744	538,183	14,663	58,979	15,795	204,999	22,856
1992	1,255	66,415	437,413	11,850	50,697	12,801	177,439	19,699
1993	1,024	58,749	409,619	11,429	53,501	10,818	159,481	17,955
1994	852	46,911	351,743	9,653	49,070	9,517	160,178	17,630
1995	801	55,901	420,151	11,000	65,512	10,850	157,662	18,822
1996	830	55,871	350,929	9,325	49,325	10,955	162,555	19,573
1997	998	70,134	324,595	9,117	52,824	11,059	160,161	19,670
1998	963	82,382	282,920	7,614	42,384	10,204	167,323	18,405
1999	678	51,124	293,146	7,031	43,236	9,596	147,771	14,888
2000	552	49,685	248,588	5,908	44,434	9,716	175,046	17,525
2001		48,315		6,283		10,406		18,385
2002		47,191		6,031		10,152		18,750
2003		46,067		5,864		10,025		19,141
2004		44,943		5,529		9,899		19,531
2005		43,820		5,361		9,772		19,922
2006		42,247		5,110		9,645		20,443
2007		41,348		4,942		9,518		20,703
2008		39,887		4,691		9,391		21,094
2009		38,764		4,440		9,137		21,484
2010		37,640		4,189		9,010		21,875

(出所) 経済産業省、「機械統計年報」

5.4 変圧器置き換えによる省エネルギーの評価1（使用効果）

最新電磁鋼板を使用した変圧器の省エネルギー効果を量る方法は、古い変圧器を新しい変圧器に置き換えることによって評価できる¹³⁾。古い変圧器を新しい変圧器に置き換える場合、市場で何台が置き換えられたかという統計データは無い。変圧器の寿命を30年としたので、例えば、1990年での変圧器交換における省エネルギー量の評価には、1960年に生産された変圧器が全て置き換えられるとしたらどれくらいの省エネルギー効果があるかを見ることにする。従って、1960年の生産台数と1990年の生産台数を比べて、1960年の生産台数が小さければ、1990年に全数置き換わるとした。逆に、1960年の生産台数が1990年の生産台数より大きければ、1960年に生産された変圧器は全数1990年に置き換えられないので、1990年の生産台数分だけ置き換わったと考えることにした。

1年あたりの機器使用による省エネ効果

$$= \text{最小値（評価年での変圧器生産容量、30年前の変圧器生産容量）} \\ \times \left(\text{評価年での単位容量あたりの変圧器無負荷損} \right. \\ \left. - \text{30年前の単位容量あたりの変圧器の無負荷損} \right) \\ \times \text{使用時間} \quad [\text{kWh/年}]$$

計算結果を表5.13a,b,c,dに示す。

表5.13a 取り替えた変圧器を稼動することによる省エネ効果(送配電大容量)

a. 送配電	年	1990	1995	2000	2005	2010
用大容量 (275kVで 代表する)	30年前に生産された変圧器容量 MVA	15,765	24,357	60,762	44,763	94,783
	評価年に生産された変圧器容量 MVA	66,243	55,901	49,685	43,820	37,640
	置き換えられた変圧器容量 MVA	15,765	24,357	49,685	43,820	37,640
30年前の変圧器と新規製作年の 変圧器との単位容量あたり無負荷損差	kW/MVA	-0.60	-0.48	-0.41	-0.31	-0.24
送配電の全無負荷損低減電力	kW	-9,459	-11,691	-20,371	-13,584	-9,034
稼動時間	h	8760	8760	8760	8760	8760
新規トランスに置き換えた ことによる無負荷損低減量	MkWh	-82.9	-102.4	-178.4	-119.0	-79.1

表5.13b 取り替えた変圧器を稼動することによる省エネ効果(配電標準容量)

b. 送配電	年	1990	1995	2000	2005	2010
用標準容量 (6.6kVで 代表する)	30年前に生産された変圧器容量 MVA	2,304	2,315	4,767	3,282	6,975
	評価年に生産された変圧器容量 MVA	13,342	11,000	5,908	5,361	4,189
	置き換えられた変圧器容量 MVA	2,304	2,315	4,767	3,282	4,189
30年前の変圧器と新規製作年の 変圧器との単位容量あたり無負荷損差	kW/MVA	-1.40	-1.07	-0.90	-0.78	-0.62
送配電の全無負荷損低減電力	kW	-3,226	-2,477	-4,290	-2,560	-2,597
稼動時間	h	8760	8760	8760	8760	8760
新規トランスに置き換えた ことによる無負荷損低減量	MkWh	-28.3	-21.7	-37.6	-22.4	-22.8

表 5.13c 取り替えた変圧器を稼動することによる省エネ効果(受電大口契約)

c. 受電用年		1990	1995	2000	2005	2010
大口契約 (66kVで 代表する)	30年前に生産された変圧器容量 MVA	2,994	7,891	18,488	11,341	16,936
	評価年に生産された変圧器容量 MVA	14,417	10,850	9,716	9,772	9,010
	置き換えられた変圧器容量 MVA	2,994	7,891	9,716	9,772	9,010
30年前の変圧器と新規製作年の 変圧器との単位容量あたり無負荷損差 kW/MVA		-1.23	-0.89	-0.68	-0.53	-0.47
送配電の全無負荷損低減電力 kW		-3,683	-7,023	-6,607	-5,179	-4,235
稼動時間(表5-10) h		3,971	3,684	3,604	3,600	3,600
新規トランスに置き換えた ことによる無負荷損低減量 MkWh		-14.6	-25.9	-23.8	-18.6	-15.2

表 5.13d 取り替えた変圧器を稼動することによる省エネ効果(受電標準容量)

d. 受電用年		1990	1995	2000	2005	2010
小口契約 (6.6kVで 代表する)	30年前に生産された変圧器容量 MVA	4,101	4,120	8,486	5,843	12,417
	評価年に生産された変圧器容量 MVA	19,601	18,822	17,525	19,922	21,875
	置き換えられた変圧器容量 MVA	4,101	4,120	8,486	5,843	12,417
30年前の変圧器と新規製作年の 変圧器との単位容量あたり無負荷損差 kW/MVA		-1.40	-1.07	-0.90	-0.78	-0.62
送配電の全無負荷損低減電力 kW		-5,741	-4,408	-7,637	-4,558	-7,699
稼動時間(表5-10) h		2,299	2,438	2,665	3,048	3,491
新規トランスに置き換えた ことによる無負荷損低減量 MkWh		-13.2	-10.7	-20.4	-13.9	-26.9

従って、新規に置き換えられた変圧器を30年使用することによる省エネ効果は、まとめると表5.14の様になる。

表 5.14 置き換えた変圧器を30年稼動させることによる省エネ効果

年		1990	1995	2000	2005	2010
e. 当該年の無負荷損低減量 MkWh		-138.9	-160.7	-260.2	-174.0	-144.0
30年分 積算	f. 無負荷損低減量 MkWh	-4,168	-4,822	-7,806	-5,219	-4,320
	g. 一次エネルギー換算 PJ	-39.4	-45.6	-73.8	-49.3	-40.8
	h. 原油換算 万kL	-107.1	-123.9	-200.5	-134.1	-111.0
	i. 排出CO2量換算 万t-CO2	-175.1	-188.1	-288.8	-193.1	-159.8

$e=(表5-13の)a+b+c+d$ 、 $f=30[年] \times e$ 、 $g=f \times 3,600[秒] / (0.381^{注}) \times 1,000,000$ 、

$h=g \times 2.7185[万kL/PJ]$ 、 $i=f \times 電気使用端CO2排出原単位(表5-9)$

注：一次エネルギー換算は、熱効率0.381¹¹⁾の平均発電プラントを想定。

(出所) (財)日本エネルギーセンター、「エネルギー・経済統計要覧」

5.5 変圧器置き換えによる省エネルギーの評価2（使用鋼材削減効果）

新規の変圧器に使用されている方向性電磁鋼板は、30年前の方向性電磁鋼板に比して、材料としての磁気特性(延いては、無負荷損失)が改善されている。磁気特性がよくなれば、同じ電力を変換するのに必要な変圧器鉄心は小さくできる。従って、使用される方向性電磁鋼板の使用量、つまり、電磁鋼板の生産量を減らすことができる。

電磁鋼板の鉄損と鋼材削減量の関係は添付資料に示す。結果だけ引用する。

変圧器製造時の電磁鋼板使用削減量

$$= \left(\sqrt{\frac{\text{新しい電磁鋼板の単位容量あたりの鉄損}}{\text{30年前の電磁鋼板の単位容量あたりの鉄損}}} - 1 \right) \times \text{評価年での電磁鋼板使用重量}$$

ここで、評価年での電磁鋼板使用重量は、次式で与えられる。

$$\text{評価年での電磁鋼板使用重量} = \text{評価年に置換えた変圧器容量} \times \text{容量あたりの変圧器重量（高圧別）} \times \text{電磁鋼板使用割合（高圧別）}$$

電磁鋼板生産削減による省エネ量の評価結果を表5.15a,b,cに示す。

表 5.15a 電磁鋼板生産量の減少による省エネ効果（送配電用大容量）

a. 送配電用大容量 (275kVで代表する)		年	1990	1995	2000	2005	2010
置換えた容量 (表5-13aより)	MVA		15,765	24,357	49,685	43,820	37,640
新規生産変圧器の重量 (0.7t/MVA(表5-8))	t		11,036	17,050	34,780	30,674	26,348
電磁鋼板使用重量 (電磁鋼板使用率0.31(表5-8))	t		3,421	5,285	10,782	9,509	8,168
30年前と新規製作年の変圧器単位容量あたりの鉄損の比(表5-7より)	kW/MVA / kW/MVA		0.45	0.48	0.50	0.55	0.60
高配向電磁鋼板使用による鋼板使用量削減量	t		-1,127	-1,630	-3,158	-2,452	-1,841

表 5.15b 電磁鋼板生産量の減少による省エネ効果（受電用大口契約）

b. 受電用大口契約 (66kVで代表する)		年	1990	1995	2000	2005	2010
置換えた容量 (表5-13cより)	MVA		2,994	7,891	9,716	9,772	9,010
新規生産変圧器の重量 (4.0t/MVA(表5-8))	t		11,976	31,564	38,864	39,088	36,040
電磁鋼板使用重量 (電磁鋼板使用率0.28(表5-8))	t		3,353	8,838	10,882	10,945	10,091
30年前と新規製作年の変圧器単位容量あたりの鉄損の比(表5-7より)	kW/MVA / kW/MVA		0.42	0.47	0.52	0.57	0.57
高配向電磁鋼板使用による鋼板使用量削減量	t		-1,181	-2,757	-3,026	-2,688	-2,454

表 5.15c 電磁鋼板生産量の減少による省エネ効果（配電用 + 受電用、標準容量）

c. 送配電用及び受電用標準容量 (6.6kVで代表する)	年	1990	1995	2000	2005	2010
置換えた容量 (表5-13b+dより)	MVA	6,405	6,435	13,253	9,125	16,606
新規生産変圧器の重量 (7.15t/MVA(表5-8))	t	45,796	46,010	94,759	65,244	118,733
電磁鋼板使用重量 (電磁鋼板使用率0.35(表5-8))	t	16,029	16,104	33,166	22,835	41,557
30年前と新規製作年の変圧器単位容量あたりの 鉄損の比(表5-7より)	kW/MVA / kW/MVA	0.47	0.51	0.53	0.54	0.59
高配向電磁鋼板使用による 鋼板使用量削減量	t	-5,091	-4,562	-8,937	-6,037	-9,727

従って、その年に新規に置き換えられた変圧器がもたらす電磁鋼板生産量の削減効果は、まとめると表 5.16 の様になる。

表 5.16 置き換えた変圧器の小型化による電磁鋼板生産量削減省エネ効果

	年	1990	1995	2000	2005	2010
d. 電磁鋼板使用重量 表5-15 a+b+c	t	22,803	30,227	54,829	43,289	59,816
e. 電磁鋼板使用量削減量 表5-15 a+b+c	t	-7,399	-8,950	-15,121	-11,177	-14,022
f. 鋼材生産量削減による鋼材生産時の省エネ量 38.92×10^{-6} PJ/t	PJ	-0.29	-0.35	-0.59	-0.44	-0.55
g. 原油換算 2.7185 万kL/PJ	万kL	-0.78	-0.95	-1.60	-1.18	-1.48
h. 排出CO2量換算 表5-9の鉄鋼CO2排出係数	万t-CO2	-2.38	-2.86	-4.82	-3.60	-4.57

f=e × 38.92 × 10⁻⁶[PJ/t]、g=f × 2.7185 × 10⁻⁶[万kL/PJ]、
h=f × 鉄鋼CO2排出係数(表5-9) × 10⁻¹[万t-CO2/PJ]

5.6 まとめ

電磁鋼板は、図 5.1 に示す様に、熱延加工から冷延加工に製造プロセスが変る過程で、材料としての磁気特性（鉄損）が 1960 年代半ばまでに大幅に改善され、変圧器の大きさも著しく小さくなった。70 年代から 90 年頃には、高磁束密度化、薄厚化、磁区細分化などのユニークな製法の導入により更なる高性能化が図られた。90 年以降も、鉄損の改善に技術開発を進めているが、鉄損自体がすでに限界値に近いいため鉄損の低減割合は飽和してきている。

変圧器の所有者にとって、30 年使用したとき、新規変圧器に置き換える選択肢と、そのまま既設変圧器を使い続ける選択肢とがある。新規変圧器に置き換える場合と既設変圧器を使い続ける場合とのエネルギー使用量での比較の結果、電磁鋼板の高性能化により無負荷損

が改善されたことによる省エネルギー効果は、1990年生産のものが電力量にして、4,168百万kWhのエネルギーに相当する。以降、順次4,822百万kWh(1995)、7,806百万kWh(2000)、5,219百万kWh(2005)、4,320百万kWh(2010)の電力の損失削減が図られる。(表5.17)

一方、磁気特性の優れた電磁鋼板を使うことにより、変圧器の小型化が可能となり、小型変圧器への置き換えによる電磁鋼板使用量の削減が進んでいる。この電磁鋼板使用削減量を計算した結果、1990年(7,400t)、95年(8,900t)、2000年(15,100t)、2002年(11,200t)、10年(14,000t)と削減効果は増加しており、この傾向は今後も継続するものと予想される。

表5.17に示した、将来の電磁鋼板使用量に関するポテンシャルについては、90年以降鉄損の低減割合が飽和してきており、現時点で評価可能な2010年の値をポテンシャルに採用した。

表5.17 変圧器置き換えによる省エネ効果のまとめ

	1990	1995	2000	2005	2010	ポテンシャル
電磁鋼板使用量 t	22,803	30,227	54,829	43,289	59,816	59,816
電磁鋼板使用量削減量 t	-7,399	-8,950	-15,121	-11,177	-14,022	-14,022
使用期間(30年)中の無負荷損失削減量 MWh	-4,168	-4,822	-7,806	-5,219	-4,320	-4,320
一次エネルギー換算						
機器使用による運転時の省エネ効果 PJ	-39.4	-45.6	-73.8	-49.3	-40.8	-40.8
機器製造時の使用鋼材低減による省エネ効果 PJ	-0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.6	-0.6
一次エネルギー換算省エネ効果合計 PJ	-39.7	-46.0	-74.4	-49.7	-41.4	-41.4
原油換算						
機器使用による運転時の省エネ効果 万kL	-107.1	-123.9	-200.5	-134.1	-111.0	-111.0
機器製造時の使用鋼材低減による省エネ効果 万kL	-0.8	-1.0	-1.6	-1.2	-1.5	-1.5
原油換算省エネ効果合計 万kL	-107.9	-124.9	-202.1	-135.3	-112.5	-112.5
CO2排出量換算						
機器使用による運転時の省エネ効果 万t-CO2	-175.1	-188.1	-288.8	-193.1	-159.8	-159.8
機器製造時の使用鋼材低減による省エネ効果 万t-CO2	-2.4	-2.9	-4.8	-3.6	-4.6	-4.6
CO2排出量削減効果合計 万t-CO2	-177.5	-191.0	-293.6	-196.7	-164.4	-164.4

変圧器の高機能製品への置き換えと電磁鋼板使用量削減を総合評価し、省エネルギー量をCO₂排出量に換算すると2000年には約300万t - CO₂/年の削減効果を上げたことになる。最近では鉄損の低減割合は飽和してきているが、2010年でも約160万t - CO₂/年の削減効果が期待でき、グローバルな課題となっている地球温暖化防止対策の視点からも、高機能電磁鋼板を用いた最新の変圧器への置き換えを推進するような諸施策が望まれる。

本報告書では、日本国内の変圧器を例に取り上げて、省エネルギーとCO₂排出量の削減効果を算定した。電磁鋼板は、国内の年間粗鋼生産約1億tの内、わずか2%程度の生産割合であるが、その製品を通じた省エネルギー貢献という点では大きな効果があることを定量的に評価することができた（総括参照）。

(参考資料)

- 1) 山崎俊雄、木本忠昭、「新版 電気の技術史」、オーム社
- 2) 直川一也、「科学技術史 電気・電子技術の発展」、東京電機大学出版局
- 3) 変電機器省エネルギー専門委員会、「変電機器の省エネルギー化方策と効率
運転」、電気協同研究、第 40 巻(昭和 59 年)、第 4 号、(社)電気協同研究会
- 4) 通商産業省 資源エネルギー庁、(社)日本鉄鋼連盟、「平成 8 年度新エネルギー
一等導入促進基礎調査、L C A 的視点からみた鉄鋼製品利用のエネルギー
評価調査」(平成 9 年 3 月)
- 5) 経済産業省、「機械統計年報」
- 6) 変電設備点検合理化専門委員会、「変電設備の点検合理化」、電気協同研究、
第 56 巻(平成 12 年)、第 2 号、(社)電気協同研究会
- 7) リサイクル技術専門委員会、「鋸配電機器リサイクルの現状と動向、今後の
課題に関する報告書」、(社)日本電機工業会(2000.12)
- 8) 21 世紀変電技術専門委員会、「21 世紀変電技術 - サブステーションか
らマルチステーションへ - 」、電気協同研究、第 58 巻(平成 14 年)、(社)電
気協同研究会
- 9) 電気事業連合会統計委員会、「電気事業便覧」、(社)日本電気協会
- 10) 電気事業連合会 Web サイト、<http://www.fepec.or.jp/>
- 11) 日本エネルギー経済研究所 計量分析部編、「エネルギー・経済統計要覧」、
(財)日本エネルギーセンター
- 12) (社)日本鉄鋼連盟調べ
- 13) (社)日本電機工業会コメント

添付資料1：鉄損の違いからトランス用電磁鋼板の重量軽減率を求める

基本的考え方：古い方向性電磁鋼板（透磁率 μ_{OLD} ）で確保したトランス内の磁気エネルギーを新しい方向性電磁鋼板（透磁率 μ_{NEW} ）で確保する。

トランスの鉄心の磁束通過断面積を S 、磁気回路長さを L とすると、鉄心内に溜まる磁気エネルギー E は、

$$E = H \cdot B \cdot L \cdot S$$

である。ここで、 H は一次巻線が作る磁界、 B は磁界 H により誘起される鉄心内の磁束密度で、鉄心の透磁率を μ とすると、

$$B = \mu H$$

であり、鉄心の体積 V は、

$$V = L \cdot S$$

である。従って、鉄心内に溜まる磁気エネルギー E は、

$$E = \mu H^2 V$$

高配向方向性電磁鋼板でのトランスは、普通方向性電磁鋼板でのトランスと磁気エネルギーが同じになるように作るので、

$$E_{\text{NEW}} = E_{\text{OLD}}$$

即ち、

$$\mu_{\text{NEW}} H^2 V_{\text{NEW}} = \mu_{\text{OLD}} H^2 V_{\text{OLD}}$$

従って、

$$\mu_{\text{NEW}} V_{\text{NEW}} = \mu_{\text{OLD}} V_{\text{OLD}}$$

それぞれの電磁鋼板の密度を ρ_{NEW} 、 ρ_{OLD} とすると、それぞれの重量 W_{NEW} 、 W_{OLD} は、

$$W_{\text{NEW}} = \rho_{\text{NEW}} V_{\text{NEW}}$$

$$W_{\text{OLD}} = \rho_{\text{OLD}} V_{\text{OLD}}$$

但し、高配向方向性電磁鋼板も普通方向性電磁鋼板も密度は殆ど同じなので、 $\rho_{\text{NEW}} = \rho_{\text{OLD}} = \rho$ を ρ で表すと、

$$W_{\text{NEW}} = \rho V_{\text{NEW}}$$

$$W_{\text{OLD}} = \rho V_{\text{OLD}}$$

である。

現在のトランス（普通方向性電磁鋼板と高配向方向性電磁鋼板との併用）重量 W_{T}^{r} は、普通方向性電磁鋼板重量 $W_{\text{OLD}}^{\text{r}}$ と高配向方向性電磁鋼板重量 $W_{\text{NEW}}^{\text{r}}$ との和であるので、

$$W_{\text{T}}^{\text{r}} = W_{\text{OLD}}^{\text{r}} + W_{\text{NEW}}^{\text{r}}$$

一方、高配向方向性電磁鋼板が全く使用されない普通方向性電磁鋼板だけでトランスが生産された場合のトランスの重量 W_{T}^{i} は

$$W_{\text{T}}^{\text{i}} = W_{\text{OLD}}^{\text{1}} + W_{\text{OLD}}^{\text{2}}$$

数である。よって、鉄損Pは次式の形になる。

$$P = K_1 B_m^2 \quad (\text{ただし、} K_1 = 2 \pi e t^2 f^2 = \text{定数})$$

電磁鋼板内に作られる最大磁束密度 B_m は、変圧器の一次巻線に通電して作られる。

一次巻線が作る次界を H_m とすると、鉄心内に誘起される最大磁束密度 B_m との間には、鋼板の透磁率を μ として、次式で表される。

$$B_m = \mu H_m$$

従って、鉄損Pは、

$$P = K_1 \mu^2 H_m^2$$

と置き換えられる。

H_m は、一次巻線に電流を流したとき、空気中に作る磁界なので、変圧器の鉄損評価にとっては、外因であり、定数としてよい。

最終的に、鉄損は鋼板の透磁率の2乗に比例することになる。即ち

$$P = K \mu^2 \quad (\text{ただし、} K = K_1 H_m^2 = \text{定数})$$

透磁率の異なる鋼板がある場合、その鉄損と透磁率の2乗との比例係数Kは次式で与えられる。

$$K = P_1 / \mu_1^2 = P_2 / \mu_2^2$$

即ち、

$$\mu_2^2 / \mu_1^2 = P_2 / P_1$$

更に、

$$\mu_2 / \mu_1 = (\mu_2^2 / \mu_1^2)^{1/2} = (P_2 / P_1)^{1/2} \dots \dots \dots$$

「電磁鋼板の鉄損が改善されることにより、鋼材使用量がどれくらい減るか？」は、式に式を代入して、

$$\begin{aligned} W &= [(\mu_{NEW} / \mu_{OLD}) - 1] W_{NEW}^f \\ &= [(P_{NEW} / P_{OLD}) - 1] W_{NEW}^f \dots \dots \dots \end{aligned}$$

で求まる。ここで、 W_{NEW}^f は、全国で新規にその年に使われた電磁鋼板の全重量である。

お問い合わせ：ieej-info@tky.ieej.or.jp