

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 2 . 発電ボイラー（耐熱鋼管）

第二研究部環境グループ研究員 齊藤 晃太郎

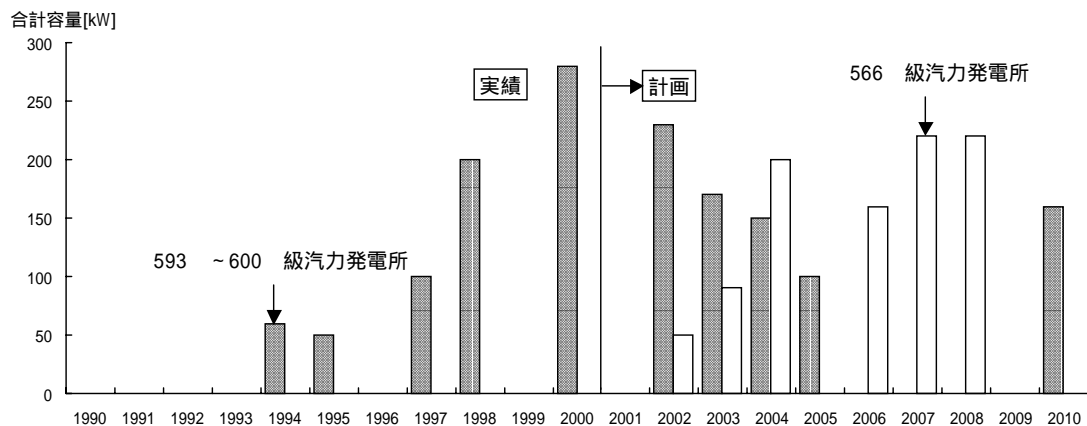
2.1 発電ボイラー用高性能耐熱鋼管²の使用動向

(1) 超臨界圧発電所³の運用開始実績、および今後の設置計画

発電ボイラー用に使用される高性能耐熱鋼管の生産量は、高性能耐熱鋼管が使用される蒸気温度と圧力の高い超臨界圧発電所の設置計画の動向に左右される。

図 2.1 に 593 ～600 級汽力発電所⁴、および 566 級汽力発電所の年度別運用開始容量合計値の 1990 年から 2000 年までの実績と 2001 年から 2010 年までの計画を示す。対象とする 593 ～600 級汽力発電所は、1994 年に 60 万 kW の石炭火力発電所が運用開始され、以降 2000 年まで、運用を開始した合計容量は、年度によって差はあるが、新規の発電所の建設とともに順調に増加していることがわかる。

図 2.1 566 級、および 593 ～600 級汽力発電所の年度別運用開始発電容量の合計
(実績推移、および計画)



(出所) 経済産業省、「平成 11・12 年度 電源開発の概要 その計画と基礎資料」 エネルギーニューズ社「企業別全国発電所総覧」 および、10 電力会社各社、電源開発(株)への電源開発計画に関するヒアリングにより作成。

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。

² 改良型 9Cr 鋼、及びステンレス継目無鋼管等の高合金鋼による耐熱鋼管をさす。近年、国内の火力発電設備においては蒸気条件の高温高圧化等による効率向上が図られている。本節では、特に蒸気温度が 593 ～600 の汽力発電所において使用される高合金鋼を対象とした。

³ 本節では、高性能耐熱鋼管が使用される BTG (Boiler Turbine Generation) 型の汽力発電所として現状最も蒸気温度、および発電端発電効率が高いとされる 593 ～600 級の汽力発電所を、従来型の耐熱鋼管が使用される BTG 型汽力発電所として 566 級の汽力発電所を設定した。

⁴ 対象とする BTG 型の汽力発電所は、すべて石炭火力発電所である。

また今後の見通しとしては、2001年以降2010年までの間に4基の100万kW級を含む合計810万kWの運用開始が計画されている(図2.1、表2.1)⁵。

表2.1 593～600級汽力発電所の運用開始容量の実績、および見込み(基)

容量[万kW]	年度	1986～1990年度	1991～1995年度	1996～2000年度	2001～2005年度 (計画)	2006～2010年度 (計画)	ポテンシャル ^(注1)	560度級(2001～2010年)
40		0	0	0	0	0	1	1
50		0	1	0	0	0	1	1
60		0	1	0	2	1	5	2
70		0	0	1	2	0	2	0
90		0	0	0	1	0	2	1
100		0	0	3	3	1	6	2
105		0	0	2	0	0	0	0
110		0	0	0	0	0	4	4

(出所) 経済産業省「平成11・12年度 電源開発の概要 その計画と基礎資料」、エネルギーニューズ社「企業別全国発電所総覧」、および10電力会社各社、電源開発(株)への電源開発計画に関するヒアリングにより作成。

(注1) ポテンシャルは、2001～2010年までの593～600級汽力発電所運用開始見込みに加え、2001年度から2010年度までに運用開始予定の566級汽力発電所が593～600級汽力発電所に変更された場合を評価した運用開始見込み基数。

(2) ボイラーにおける高性能耐熱鋼管の使用量

発電設備の蒸気条件が高温・高圧化する動きに伴って、ボイラーにおける高温高圧化に対する設計上の配慮が重要となってきている。

ボイラーの最も重要な部材は過熱器管、再熱器管、主蒸気管および蒸発管であり、蒸気条件の進展に合わせて、高温強度、耐高温腐食性、耐水蒸気酸化性や組織安定性等ますます過酷化する条件に適合した耐熱鋼管を開発・適用してきている(参考文献(2)より引用)。

表2.2に、566級汽力発電所と600級汽力発電所(燃料:石炭)のボイラーにおける単位発電容量当りの低合金鋼、および高合金鋼の使用量を示す。566級汽力発電所と比較して600級汽力発電所では単位発電容量当りの高合金鋼の使用量が1万kW当りで11.83トン増加している一方、低合金鋼の使用量は1万kW当り11.55トン減少していることがわかる。

表2.2 566級汽力発電所と600級汽力発電所のボイラーにおける単位発電容量当りの鋼材使用量

	566級汽力発電所 [ton/万kW]	600級汽力発電所 [ton/万kW]	鋼材使用量変化 [ton/万kW]
低合金鋼	67.54	55.99	-11.55
高合金鋼	3.28	15.12	11.83
合計	70.83	71.11	0.28

(出所) (社)日本鉄鋼連盟調べ

⁵ 現段階の電源開発計画においては、蒸気温度が600を超える汽力発電所の設置計画はない(10電力会社各社、および電源開発(株)へのヒアリングによる)。

2.2 省エネルギーの評価方法

(1) 省エネルギーをもたらす理由

BTG (Boiler Turbine Generation) 発電設備は、蒸気を作動媒体として蒸気の持つ熱エネルギーを動力に変換する熱機関を利用したものである。具体的には、ボイラーにおいて燃料を燃焼し作られた蒸気がタービンに導かれ、動力を生み出した後、復水器に至る。蒸気条件が高温高圧化すればするほど、投入した熱エネルギーに対して動力に変換される熱エネルギーの比率が大きくなり、その結果、電気として取り出される熱エネルギーの比率が向上する。

汽力発電所の発電効率は稼動状況によって変化はあるものの、従来の汽力発電所と比較して蒸気条件を高めた高効率の発電設備では、単位発電電力量当たりの燃料使用量が減少し発電所の運用期間に亘り燃料節減による省エネルギー効果がある。

(2) 高性能耐熱鋼管の導入による発電用燃料使用量の削減効果

当該年度において運用開始した国内の BTG 発電設備に使用されているボイラー鋼管がすべて従来型耐熱鋼管である場合の燃料使用量に対して、高性能耐熱鋼管が導入された BTG 発電設備において発電効率が向上する分、燃料使用量が減少する。

発電効率の向上による燃料使用量の減少に対する耐熱鋼管導入の寄与度に関しては、参考文献(1)における評価を採用することとし、燃料節減量の 4 分の 1⁶を発電効率向上による燃料節減量に対するボイラー用高性能耐熱鋼管の寄与度とした。以下に参考文献(1)からの抜粋を示す。

「汽力発電設備の効率向上は、ボイラー・タービンの耐熱材料の開発による高い蒸気温度と二段再熱⁷など、サイクルの改善が大きな要因であるが、流体力学的改良や長大排気翼の開発も重要な貢献をした。従って、発電ボイラー用耐熱鋼管の寄与は、H7 年度の発電量に対して、発電端効率が 43～44%に向上した効果の四半分(蒸気条件の寄与度 50%としてボイラーの寄与はさらにその半分)とマクロに考えると、～(参考文献(1)、P76)。

単年度の省エネルギー効果を算出する式を以下に示す。

単年度エネルギー節減量

$$\begin{aligned} &= \text{従来型耐熱鋼管を使用する発電設備から高性能耐熱鋼管を使用する発電設備へ} \\ &\quad \text{移行されることによる発電効率の向上による燃料節減量} \dots\dots\dots (Z) \\ &\times \text{高性能耐熱鋼管使用による燃料節減効果への寄与度} \end{aligned}$$

⁶ (社)日本電機工業会、および(社)日本産業機械工業会へのヒアリング等により、参考文献(1)の記述内容を踏襲することは妥当であると判断し、蒸気条件(温度上昇)の改善による燃料節減量への寄与度を、タービン側寄与度 50%、ボイラー側寄与度 50%とし、さらにボイラー側寄与度 50%の内の 50%がボイラー材料の高機能化による寄与度とした。

⁷ 二段再熱サイクルについては、各発電設備によって種々の場合が考えられる。本分析では蒸気温度が 566 レベルから 593～600 レベルに向上することによる BTG 発電設備のシステム全体としての効率向上による省エネルギー効果を評価の対象としている。従って、対象としている 566 級汽力発電所と 600 級汽力発電所において、同程度の二段再熱サイクルが導入されていると仮定し、その寄与度は考慮しないこととした。

ここで、

- (Z) = 当該年度に運用を開始した 593 ~ 600 級汽力発電所が 566 級であると仮定したときの年間燃料使用量
 - 当該年度に運用を開始した 593 ~ 600 級汽力発電所の年間燃料使用量

2.3 高性能耐熱鋼管の導入による省エネルギー量

(1) 対象年度における 593 ~ 600 級汽力発電所の運用開始容量

対象年度の評価においては、年度別の運用開始容量に差があるため（図 2.1）、当該年度の過去 5 年間の平均値を対象年度における 593 ~ 600 級汽力発電所の運用開始容量として分析することとした（表 2.3）。

また汽力発電所の発電電力量は、各々の発電所における稼働状況に左右される。本分析においては、平成 11 年度における 593 ~ 600 級汽力発電所 11 基の暦時間利用率の平均（約 80%）を稼働率として対象年度の発電電力量を算定した（表 2.4）。以下に当該年発電電力量の算出式を示す。

$$\text{(当該年発電電力量)} = \text{年間運用開始容量} \times 24[\text{h/日}] \times 365[\text{日}] \times \text{暦時間稼働率} 80[\%]$$

燃料削減効果を定量的に評価するための 566 級汽力発電所、および 593 ~ 600 級汽力発電所における発電端発電効率については、実際に運用されている発電所における発電端発電効率のヒアリング値（各 3 発電所）の平均を用いた。表 2.5 に、定量化に使用した発電端発電効率を示す。

表 2.3 対象年度の 593 ~ 600 級汽力発電所の運用開始容量

	1990年	1995年	2000年	2005年(見込み)	2010年(見込み)	ポテンシャル
年間運用開始容量 ^(注) (万kW)	0	22	116	130	32	175

(注) 当該年の過去 5 年間に運用が開始された 593 ~ 600 級汽力発電所の容量を年度当りに換算した容量。ポテンシャルは、2001 ~ 2010 年度における運用開始容量を年度当りに換算した容量

表 2.4 当該年度の対象発電電力量

	1990年	1995年	2000年	2005年(見込み)	2010年(見込み)	ポテンシャル
当該年発電電力量[GWh]	0	1,542	8,129	9,110	2,243	12,264

(注1)(出所) 「平成 12 年度電力需給の概要」より、超臨界圧石炭火力発電所 11 基の暦時間利用率の平均（80%）を用いて試算

表 2.5 発電端発電効率

	発電端 発電効率[%]
593 ~ 600 級発電所	43.1%
566 級発電所	41.5%

(注) 電力会社へのヒアリングによる発電端発電効率（サンプル数：3）の平均値

以上、および2.2(2)に示した計算方法に従い、高性能耐熱鋼管の導入による燃料節減効果を算定した結果を表2.6に示す。

表2.6 高性能耐熱鋼管の導入による燃料節減効果

		1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	ポテンシャル
当該年度運用開始容量[万kW]		0	22	116	130	32	175
当該年発電電力量[GWh]		0	1,542	8,129	9,110	2,243	12,264
発電端発電効率[%]	593～600 級発電所	43.1%	43.1%	43.1%	43.1%	43.1%	43.1%
	566 級発電所	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%	41.5%
燃料使用量[千TJ/年]	593～600 級発電所	0	12.88	67.90	76.10	18.73	102.44
	566 級発電所	0	13.37	70.52	79.03	19.45	106.39
燃料節減量[千TJ/年]		0	0.496	2.618	2.934	0.722	3.949
高性能耐熱ボイラー鋼管の燃料節減寄与率[%]		25%	25%	25%	25%	25%	25%
発電所運転年数[年]		40	40	40	40	40	40
高性能耐熱ボイラー鋼管による燃料節減効果	単年[千TJ/年]	0	0.124	0.654	0.733	0.181	0.987
	使用年計 ^(注1) [千TJ]	0	4.96	26.18	29.34	7.22	39.49
	[原油換算万KI]	0	13.50	71.17	79.76	19.63	107.37
燃料節減によるCO ₂ 排出削減効果	[万ton-CO ₂]	0	45.34	239.06	267.92	65.95	360.66
	CO ₂ 排出係数 ^(注2) (石炭)[kg-CO ₂ /TJ]	91.32	91.32	91.32	91.32	91.32	91.32

(注1) (高性能耐熱ボイラー鋼管による燃料削減効果 使用年計)

= 566 級汽力発電所と比較した際の 593～600 級汽力発電所の効率向上による燃料節減量 × 高性能耐熱ボイラー鋼管の燃料節減寄与率 25% × 発電設備運転耐用年数⁸

(注2) (出所) 環境省 平成 12 年 9 月 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 参考資料 10 排出係数一覧。値は、石炭(輸入炭)の CO₂ 排出係数 2.37kg-CO₂/kg を石炭(輸入)の平均発熱量 6,200kcal/kg により換算したもの

2.4 高性能耐熱鋼管の導入による鋼材製造段階のエネルギー使用量の変化

(1) 従来型耐熱鋼管と高性能耐熱鋼管における鋼材の使用状況

566 級の汽力発電所で使用される従来型の耐熱鋼管には、低合金、および高合金が使用されている。566 級の汽力発電所と同容量の 593～600 級汽力発電所における鋼材の使用状況をみると、高性能耐熱鋼管における高合金鋼の使用比率が増加する一方で、低合金鋼の使用比率は低下する(表2.2)。

したがって、高性能耐熱鋼管が導入されることにより、鋼材の製造段階において高合金鋼の生産量が増加する分エネルギー消費量が大きくなり、また一方では低合金鋼の生産量が減少する分エネルギー消費量が減少したとみなすことができる。

⁸ 総合エネルギー調査会原子力部会(平成11年12月)の試算で使用している運転年数40年とした。

(2) 低合金鋼と高合金鋼の製造エネルギー

(社)日本鉄鋼連盟が1995年の実績(鉄連平均値)をベースに推計した製造エネルギーの原単位を表2.7に示す。

表2.7 耐熱鋼管用高合金鋼、低合金鋼の製造エネルギー原単位

	エネルギー使用量	差異
	MJ/kg	MJ/kg
低合金鋼	29.0	2.9
高合金鋼	31.9	

(出所) (社)日本鉄鋼連盟調べ

(3) 高性能耐熱鋼管の導入による製造工程のエネルギー変化の評価方法

(1)項で述べたように、566級の汽力発電所から593～600級の汽力発電所へ移行することにより、高合金鋼使用比率は増加し低合金鋼使用比率は低下する。この結果、製造段階のエネルギー使用量に変化が生じる。

本節では、製造工程のエネルギー消費量の変化分を、高合金鋼の使用量が増加することによって高合金鋼と低合金鋼の製造エネルギー原単位に差があることにより生じる増エネ分を高機能化による増エネ効果として、また全体の鋼材使用量が増加することによる増エネ分を鋼材使用増加による効果としてそれぞれ評価する。以下に算出式を示す。

(製造段階増エネルギー量)

$$= \text{当該年度に運用開始した593～600級汽力発電所における鋼材使用量と当該年度に運用した593～600級汽力発電所が566級であると仮定したときの鋼材使用量の変化による製造エネルギー変化量}$$

$$= (\text{高機能化による増エネルギー効果}) + (\text{鋼材使用量増加による増エネルギー効果})$$

ここで、

(高機能化による増エネルギー効果)

$$= \text{高合金鋼の使用増加量} \times \text{高合金鋼と低合金の製造エネルギー原単位の差異}$$

(鋼材使用量増加による増エネルギー効果)

$$= \text{鋼材使用増加量} \times \text{低合金鋼の製造エネルギー原単位}$$

(4) 高性能耐熱鋼管の導入による製造工程のエネルギー使用量

2.1の(2)に示した566級汽力発電所と593～600級汽力発電所のボイラーにおける単位発電容量当りの鋼材使用量と、前項で示した評価方法に基づいて、高性能耐熱鋼管の導入による製造工程のエネルギー消費増減量を算出した結果を表2.8に示す。

表 2.8 ボイラーへの高性能耐熱鋼管導入による製造エネルギーの増減

		1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	ポテンシャル
当該年度運用開始容量[万kW]		0	22	116	130	32	175
566 級と600 級汽力発電所の鋼材使用量の差異	低合金鋼[ton/万kW]	-11.55	-11.55	-11.55	-11.55	-11.55	-11.55
	高合金鋼[ton/万kW]	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83
	低合金鋼[ton/年]	0	-254.18	-1,340.22	-1,501.97	-369.72	-2,021.88
	高合金鋼[ton/年]	0	260.35	1,372.75	1,538.43	378.69	2,070.96
鋼材製造エネルギー 原単位[MJ/kg]	低合金鋼	29.02	29.02	29.02	29.02	29.02	29.02
	高合金鋼	31.91	31.91	31.91	31.91	31.91	31.91
	差異	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
CO2排出係数 ^(注) (鉄鋼業)[ton-CO ₂ /TJ]		82.76	81.99	81.84	82.73	83.66	83.66
鋼材使用量増加による 増エネルギー効果	鋼材使用増加 [ton/万kW]	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	鋼材使用増加 [ton/年]	0	6.17	32.54	36.46	8.98	49.08
	エネ増加量[TJ]	0	0.18	0.94	1.06	0.26	1.42
	エネ増加量 [原油換算KI]	0	4.87	25.67	28.76	7.08	38.72
	エネ増加量 [ton-CO ₂]	0	14.68	77.26	87.53	21.79	119.16
高機能化による 増エネルギー効果	高合金鋼増加 [ton/万kW]	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83	11.83
	高合金鋼増加 [ton/年]	0	260.35	1,372.75	1,538.43	378.69	2,047.30
	エネ増加量[TJ]	0	0.75	3.97	4.45	1.09	5.99
	エネ増加量 [原油換算千KI]	0	0.02	0.11	0.12	0.03	0.16
	エネ増加量 [千ton-CO ₂]	0	0.06	0.32	0.37	0.09	0.50

(注) CO₂ 排出係数は、当該年度の鉄鋼業界エネルギー消費量と CO₂ 排出量((社)日本鉄鋼連盟調べ)から試算した値。ポテンシャルの推計における CO₂ 排出係数は 2000 年の値とした。

2.5 まとめ

(1) 高性能耐熱鋼管の導入によるエネルギー消費増減の総括

593 ~ 600 級汽力発電所用に高性能耐熱鋼管が使用されることによってもたらされるエネルギー消費増減についての総括を、表 2.9 に示す。

566 級の汽力発電所から、593 ~ 600 級のそれに置き換わった場合の効率向上による燃料節減効果と、耐熱鋼管製造によるエネルギー消費増加量の差分を、省エネルギー効果として下式により評価する。

省エネルギー量 (総合評価)

- = 566 級汽力発電所と比較した際の 593 ~ 600 級汽力発電所の効率向上による燃料節減量
- × 高性能耐熱ボイラー鋼管の燃料節減寄与率 25%
- × 発電設備運転耐用年数⁹
- 耐熱鋼管製造によるエネルギー消費増加量

566 級の汽力発電所ベースで想定されるものに対する 2000 年の全体的な省エネルギー効果は、26.17 千 TJ (原油換算 71.15 万 kl、二酸化炭素換算 239.02 万トン) となる。また、ポテンシャルケースにおける全体的な省エネルギー効果は、39.49 千 TJ (原油換算 107.35 万 kl、炭素換算 360.60 万 ton CO₂) である (表 2.9)。

表 2.9 耐熱鋼管普及による省エネルギー効果の推計

		1990年	1995年	2000年	2005年	2010年	ポテンシャル
当該年度運用開始容量[万kW]		0	22	116	130	32	175
鋼材使用量の変化 (566 級 600 級)	低合金鋼[ton/年]	0	-254.18	-1,340.22	-1,501.97	-369.72	-2,021.88
	高合金鋼[ton/年]	0	260.35	1,372.75	1,538.43	378.69	2,070.96
	鋼材増加[ton/年]	0	6.17	32.54	36.46	8.98	49.08
当該年発電電力量[GWh]		0	1,542	8,129	9,110	2,243	12,264
省エネ量[千TJ]	燃料削減効果(使用年)	0	4.96	26.18	29.34	7.22	39.49
エネ増加量[TJ]	高機能化効果(製造年)	0	0.75	3.97	4.45	1.09	5.99
	鋼材使用増加(製造年)	0	0.18	0.94	1.06	0.26	1.42
エネ増減量[千TJ]総計		0	4.96	26.17	29.33	7.22	39.49
省エネ量[原油換算万kl]	燃料削減効果(使用年)	0	13.50	71.17	79.76	19.63	107.37
エネ増加量(原油換算)	高機能化効果(製造年) [原油換算千kl]	0	0.02	0.11	0.12	0.03	0.16
	鋼材使用増加(製造年) [原油換算kl]	0	4.87	25.67	28.76	7.08	38.72
エネ増減量[原油換算万kl]総計		0	13.49	71.15	79.74	19.63	107.35
省エネ量 [万ton-CO ₂]	燃料削減効果(使用年)	0	45.34	239.06	267.92	65.95	360.66
エネ増加量 [炭素換算]	高機能化効果(製造年) [千ton-CO ₂]	0	0.06	0.32	0.37	0.09	0.50
	鋼材使用増加(製造年) [ton-CO ₂]	0	14.68	77.26	87.53	21.79	119.16
エネ増減量[万ton-CO₂]総計		0	45.33	239.02	267.87	65.94	360.60

⁹ 総合エネルギー調査会原子力部会 (平成 11 年 12 月) の試算で使用している運転年数 40 年とした。

(参考文献)

- 1) 通商産業省 資源エネルギー庁、社団法人 日本鉄鋼連盟、平成8年度新エネルギー等導入促進基礎調査、LCA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
- 2) 藤田他、火力原子力発電 VOL.45 NO.10、平成6年
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁電力・ガス事業部編、平成12年度電力需給の概要 2000、平成13年3月
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁電力・ガス事業部編、平成11・12年度 電源開発の概要 その計画と概要、平成13年7月

お問い合わせ： ieej-info@tky.ieej.or.jp