

砂鉄精錬に関する研究 (第2報)

— 木炭銑角炉操業改善に関する理論的考察 —

中 村 信 夫*

Study on the Smelting of the Iron Sand (Part 2)

Theoretical Considerations on the Improvement in the
Operation of Square Blast Furnace for Charcoal Pig Iron Production

By Nobuo Nakamura

Yasugi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Many studies have been attempted for years at Yasugi Works on the Square-type Blast Furnace, which produces 5 tons of charcoal pig iron per day from the Magnetic Iron Sand.

The writer expounded in the report (I) the operating condition of the conventional type of Blast Furnace. In this paper the theoretical studies on this Furnace through calculation of thermobalance, K-Ratio (Amount of Blast Air/Charcoal Consumption), and comparison with Boudwerd curve are given out.

The results obtained are summarized as follow: —

- (1) Dreadful amount of heat loss is verified in the exhaust gases from top of the furnace, which must be decreased.
- (2) For this purpose, the most beneficial method is to increase temperature of the blast air, but it must be in the range of $K=0. \sim 3.96$.
- (3) In consideration of the gas composition compared with Boudwerd curve, it can be said that the decrease of velocity of gas-flow and, the supply of air blast abounding in oxygen are essential, and most of all, the temperature of air must be increased for the above purpose.

[I] 緒 言

筆者は第一報⁽¹⁾に於て、砂鉄精錬用木炭銑角炉の過去の実態について報告した。本研究当初の目標は、従来殆ど科学的検討のなされていないこの種木炭銑小型熔鉄炉の実態を徹底的に調査研究し、それに基づき、操業法改善により現状に於て最大能率を發揮せしめ、抜本的な改革は別に基礎研究と併行せしめてその後に行うこととしたのであつた。本報に於ては、主として前報の実態調査をもとにし熱精算を行い、炉効率上よりみた考察と、木炭

量—送風量—温度の三元関係についての理論的考察を試み、続報に於ては机上ガラス模型炉による二三の実験と操業改善後の実績について報告する考えである。

[II] 熱精算上よりみた改善の要点

本角型熔鉄炉は当時炉高約 4.5 m、出銑量 5 t/day の小型断面矩形炉であつて、生産される白銑の優秀性は衆知の事実であるが、熱経済上より観た場合、幾多の欠陥を有していることが、その木炭消費量の点よりも予想されるところであつた。本熱精算は昭和 24 年 1 月 22 日～27 日の 6 日間の平均実績より計算されたものであつ

* 日立製作所安来工場

第 1 表 原料分析表 Table 1. Analysis of Raw-Materials, kg per ton Pig Iron

原 料	湿重量	乾重量	T. Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	CaO	MgO	P	S	Cu	C	CO ₂	TiO ₂
真砂々鉄	820	750	62.64	1.59	2.71	81.82	11.00	0.85	1.00	0.01	0.034	0.035	—	—	1.75
赤目砂鉄	1,620	1,480	58.80	6.78	21.96	38.58	13.60	2.36	1.30	0.059	0.071	0.049	—	—	7.48
木 炭	2,168.9	1,998.2	—	—	—	—	—	—	—	0.007	0.001	—	73.81	—	—
石灰石	—	87	—	—	—	—	—	54.3	0.02	0.007	0.001	—	73.81	42.56	—
白 鉄	—	1,000	—	—	—	—	Si 0.58	—	Mu 0.37	0.028	0.008	—	3.96	—	Ti 0.12
鉍 滓	—	873	4.83	4.48	1.84	—	34.30	23.60	—	—	—	—	1.17	—	18.72

て、媒溶剤、木炭、鉍滓の銑鉄噸当り使用量及び銑鉄を含めた平均化学組成は第 1 表に示す通りである。表に於て、装入砂鉄中の II 価の鉄 FeO は Ilmenite (TiO₂·FeO) 中の FeO を含む、又 Magnetite (Fe₃O₄) 及び Hematite (Fe₂O₃) は実際化学分析値より、TiO₂ は全て TiO₂·FeO として存在すると仮定して計算したものである。

送風関係としては、出銑量噸当り、実測により 8,350 Nm³/t、同温度 210°C、同圧力 60 mmHg、大気圧 769 mmHg、平均空気湿度 52% (乾球 12°C、湿球 8°C) である。又一般計算に必要な数値としては次の如くである。

- 還元熱 Fe₂O₃→Fe: 1kg の Fe に対し 1,777 kcal
Fe₃O₄→Fe: // 1,593 //

第 2 表 角 炉 の 熱 精 算 結 果

Table 2. Thermo-Balance of the Square-type Blast Furnace

項 目	入 熱		出 熱	
	kcal	%	kcal	%
(1) 木炭の発生熱	11,934.160	95.64		
(2) 熱風の顕熱	420.000	3.36		
(3) 熱風中水分の顕熱	3.619	0.02		
(4) 鉍滓の生成熱	122.220	0.98		
(5) 銑鉄等の還元熱			1,545.812	12.60
(6) 熔銑中の炭素の熱			319.968	2.35
(7) 熔銑の持去る熱			285.000	2.20
(8) 鉍滓の持去る熱			436.500	3.42
(9) 炭酸物の分解熱			34.245	0.14
(10) 装入物中水分の蒸発熱			239.460	1.33
(11) 冷却水の持去る熱			126.400	1.03
(12) 伝導輻射等の持去る熱			202.357	1.35
(13) 炉頂ガスの持去る熱			2,089.789	16.82
(14) 炉頂ガスの潜熱			7,055.568	57.24
(15) 熔滓中炭素の持去る熱			82.500	0.55
(16) 吹上砂鉄の持去る熱			62.400	0.40
計	12,479.999	100.	12,479.999	100

- FeO → Fe: 1kg の Fe に対し 1,151 kcal
MnO → Mn: 1kg の Mn に対し 2,295 //
SiO₂ → Si: // Si に対し 6,750 //
P₂O₅ → P: // P に対し 5,966 //

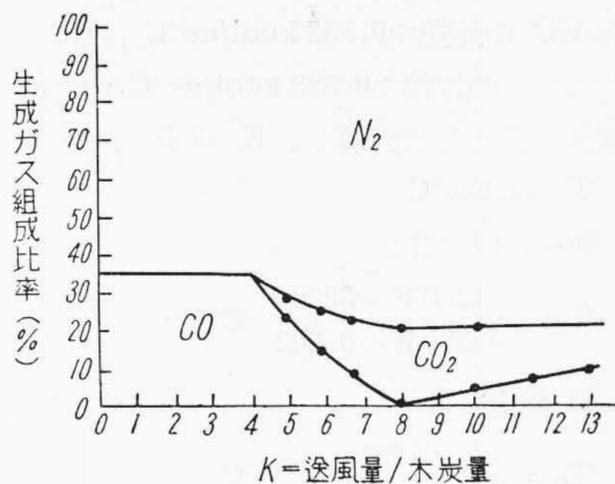
2. 炭酸物の分解熱

- CaCO₃→CO₂: CO₂1kg に対し 969 kcal
MgCO₃→CO₂: // 585 //

3. 銑鉄及び鉍滓 1 kg の保有熱: 285 及び 500 kcal

4. 鉍滓 1 kg の生成熱 140 kcal (発生)

大体以上の如き条件下に於て計算し、之を整理したものが第 2 表である。表中 (5) より (10) までは所謂利用熱であつて、(11) より (16) までは損失熱である。損失熱として最も大きいのは炉頂ガスの顕熱、潜熱であつて、熱風管加熱による送風顕熱を差引いても尚 70% に



第1図 K-比(送風量/木炭量)と生成ガス組成比率の関係曲線

Fig. 1. Relation between K-Ratio and Gas Composition

達する。この種小型炉のガス発生炉的性格を如実に示しているものであつて、これが有効な利用は将来の改善の最重要点であることを知る。

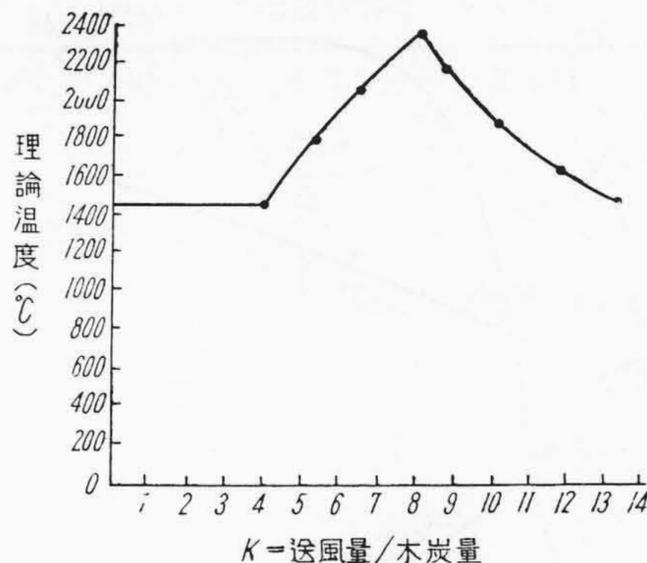
次に、熔鋳炉の効率を表わす方法には種々考えられるが一応、炉内効率、燃焼効率、高炉効率、冶金効率の4効率について算出すると次の如くなる。尚各々の効率の意味する所も附記した。

1. 炉内効率：
$$\frac{\text{(利用熱)}}{\text{(利用熱)} + \text{(炉壁損失熱)}} = \frac{22.04}{22.04 + 1.35} = 94.1\%$$
2. 燃焼効率：
$$\frac{\text{(利用熱)} + \text{(炉壁損失熱)}}{\text{(全入熱)}} = \frac{22.04 + 1.35}{100} = 23.39\%$$
3. 高炉効率： $94.1 \times 22.39 = 22.0\%$
4. 冶金効率：
$$\frac{\text{銑鉄 1t の熱量}}{\text{(利用熱)}} = \frac{2.2}{22.04} = 9.9\%$$

即ち、前報⁽¹⁾の如く、炉内温度変化曲線は大型炉に比し非常に急傾斜を為しているので、炉内全体活性化し、従つて炉内効率は比較的良好である。而して、前述の炉頂ガス損失もあり、燃焼効率は高炉に比し1/2程度であることは木炭比の大なることと考へ合せ一考を要する。特に利用熱は別の意味で前述の如く増大する事に重点を指向せねばならない。燃焼効率の小なる事は、従つて高炉そのものゝ総合効率である高炉効率を低下せしめている。又低温還元である為冶金効率は比較的良好である。

[III] 朝顔部のガス組成と(送風量)/(木炭量)=Kとの関係

熔鋳炉に於ては、一定送風量に対する木炭量の関係、一定木炭量に対する送風量の関係は、常に密接なる関連を持ち小型熔鋳炉に於ては古来より送風量の増大が木炭比低減の根本策であると云われているが、これにも自ら限度があるように思われる。この関係を考察してみると



第2図 K-比と朝顔下部の理論温度

Fig. 2. Relation between K-Ratio and Theoretical Temp. at the Lower Bosh

次の如くなる。即ち木炭中のC量を重量比にして90% (固定炭素72%、の揮発分中のC量18%)、空気中のO₂の容積比21%とし、空気量と木炭装入量の比をKとしKの変化に対し朝顔部下部に於ける燃焼過程が、

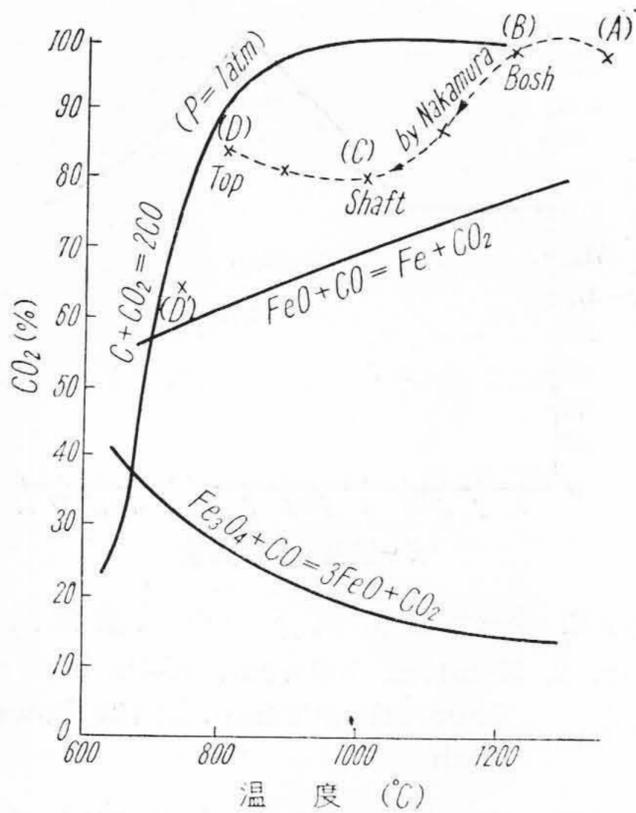


の方向に進行するものとし、理論ガス組成比を計算して図示すると第1図の通りである。

図に於て、K=3.96まではCO比は34.8%でCOはMaxである。K=3.96~7.97ではCOの量は減じCO₂が増大して来る。K=7.97以上では木炭量不足の為CO₂は減少しO₂が残留して来る。今、朝顔部以上では木炭量に過不足を起さず、間接還元を完全に行う為には朝顔下部で空気中のO₂が完全にCOに変化し得る木炭と空気の比が必要となる。即ち、第1図でCO₂又はCO₂+O₂の残留する部分ではCO₂及びO₂がCOに変化するに必要な木炭量を先進して消化する為、時間の経過と共に炉内の木炭量は不足となる。従つて木炭と風量の比K≤3.96が望ましい。然し、Kを構成する木炭量及び風量には限度があり、炉型、炉容積及び通風状況に応じた特性の究明が尙必要であるのは論ずるまでもないが、このK値は操業改善の一基準を為す重要な値である。

[IV] 羽口先理論燃焼温度とKとの関係

燃焼による発生熱量の全部が朝顔部に発生する上記組成のガスに吸収されるものと仮定して、理論ガス温度を計算し前記Kと対比せしめると第2図の如くなる。図に於てK=0~3.96までは一定温度1,260°Cとなり、K=3.96~7.97までは温度は上昇して、K=7.97では2,290°Cとなる。K=7.97以上では過剰空気の為温度は低下する。温度低下による生鋳降り、棚吊りを防止する



第 3 図 Boudwerd 曲線に対比せしめた角炉内ガス組成の変化

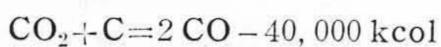
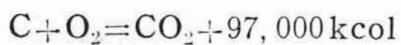
Fig 3. Boudwerd Curve and Gas Composition Curve of the Blast Furnace

為には理論空気温度の高い方で操業することが必要であるが CO₂ の多い部分で操業する場合には理論ガス組成で述べたと同様、木炭量を先進して消化する為、木炭不足となり、時間と共に羽口部の温度は低下して来る。一時的温度上昇の為には K=3.96~7.97 の間で操作することも必要であるが、木炭消費の安定性のないことは明らかである。

出来得れば K=3.96 以下で操作されるのが望ましいが、湯溜り、羽口部、朝顔部の温度を 1,250~1,300°C に安定させる為には理論ガス温度 1,260°C では不可能に近い。従つて安定操業の為には衝風予熱が絶対的な要件となつて来るのである。

この事は又、棚吊り回復処置に関する、一般大型高炉に用いられている一時的減風処理法にも、小型炉に関しては反省を要することを示唆している。即ち、高炉の場合は減風により熱をこもらせ、均一にして棚吊りを熔解除去するのであるが、熱容量の大きい炉に於てはこれは可能であるが、前記熱精算の結果よりも明らかな如く容量小さく、損失熱量の比率の大きいこの種小型炉に於ては K-値の低下は直に温度に鋭敏に影響しかえつて炉況を悪化する。但し、羽口先の風圧を急降下せしめて回復せしめる方法は有効であつて、この際は約 2 分間の減風で十分である。

尙念の為に第 2 図に使用した計算式を示すと。



N₂, O₂, CO の比熱 = 0.352 kcal/m³°C

CO₂ の比熱 = 0.583 kcal/m³°C

以上の数値を基として計算し、K=3.96 までは、

$$T_1 = 1,260^\circ\text{C}$$

K=3.96~7.97 では

$$T_2 = \frac{1280K - 3000}{0.381K + 0.202}^\circ\text{C}$$

K=6.41 以上では

$$T_3 = \frac{7280}{0.353K + 0.390}^\circ\text{C}$$

の各式で表わされる。共に、基準温度は 0°C とした。

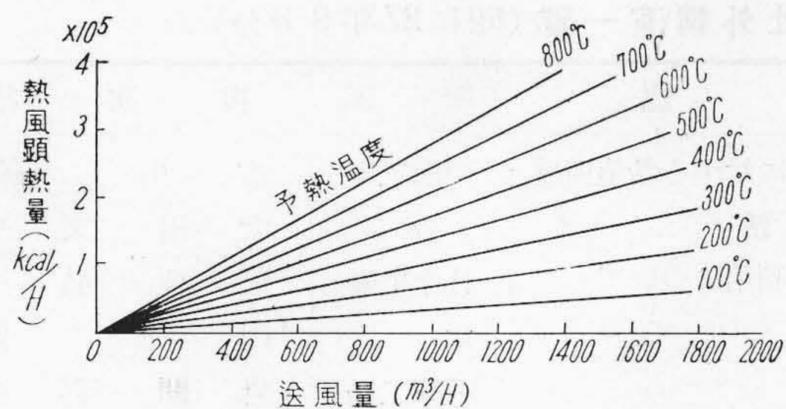
[V] 炉内ガス組成変化に対する理論的考察

小型木炭銑角炉内ガス組成の変化状況は第一報⁽¹⁾に於てその実測値を示した。これを Boudwerd 平衡曲線に対比せしめて図示したものが第 3 図の点線である。

図は、横軸に温度、縦軸に CO+CO₂=100% として、Fe₃O₄、FeO、Fe、C と共存するガスの組成を表わしたものである。従つて点線は、角炉内ガスの CO₂/CO 組成と温度変化の径路を示したものである。

此の点線は少々 S 字状を辿っている。A 部即ち羽口線に於ては向い合つた羽口間隔の狭い為、衝風が拡散し完全に木炭と反応するに時間的ズレがある為、即ち、反応速度の関係から C+O₂=CO₂ → CO₂+C=2CO の反応が完全に行われず少量の CO₂ が常に残留しているものと推定される。朝顔下部に到ると、CO=100% になることは、この部分に FeO の存在が考えられるに拘らず、十分な C の存在と、温度高き為空気(衝風)中の O₂ が完全に CO に変化していることを示す。ガスが炉内を上昇するに従つて低温の装入物によつて冷却され温度が降下すると同時に C の共存にも拘らず CO₂ が増し、CO は減少する(第 3 図 B→C)。これは CO+FeO=CO₂+Fe、CO+Fe₃O₄=3FeO+CO₂

の反応速度が、この温度(1,000°C 内外)の時、FeC 及び Fe₃O₄ の状態では、Carbon Solution 即ち、C+CO₂=2CO の反応よりも速いことを意味している。従つて、この温度部分に於ける炉内断面積を大にするか、高圧操業等により、ガス流速を下げることは羽口までに Fe-oxide の完全な間接還元を行わせ木炭の消費量を下げの一つの方法と考えられる。更に、1,000°C 以下になれば、この通常作業の場合のガス量では Fe=oxide の還元速度が Carbon Solution の反応に比し遅く、その為 CO₂/CO の比が図中 C→D の如く上昇する。然し風量を少くすればガス流速も低下する為、酸化鉄の還元が強く行われ、ガス組成は C→D' に移る。然しこの場合の温度低下は前述の考察の如く警戒しなくてはならな



第4図 送風量—予熱温度—熱風顕熱量線図
Fig. 4. Diagram of Amount of Blast Air, Pre-heating Temp. and Containing Heat of the Blast Air

い。何れにせよ炉頂では $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ の反応は大体平衡組成に近づいている。但し、図の平衡線は $CO + CO_2 = 1 \text{ atm}$ の場合であるから実際の $CO + CO_2 = 0.33 \text{ atm}$ の場合では平衡線は少し左にずれる。大型熔鉄炉では、炉頂の温度が下り、ガスの反応はおくれるためにC附近の組成のまま、 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ になつて $2CO = C + CO_2$ の反応により炭素沈積が起る。この種小型炉では炭素沈積反応は余り行われぬ。このことは還元速度、銑鉄の炭素吸収状況にも大きく影響し、大型炉と比較し一つの大きな特異性を示すものである。

ガス組成から判断すると、減風すれば当然木炭化も減少する筈であるが、後報の如く、実験結果は、かえつて逆の現象を明らかに示したものであつて、その理由は全く朝顔下部より炉底に到る部分の冷却に基因している。然し逆に、送風量を増加すると、熱精算結果より明らかな如く、炉頂損失熱量は莫大なものとなる。この対策として酸素富化操業も考えられるが、最もとり易い方法は衝風の予熱温度を上げることになつて来る。計算の結果この温度を 100°C 上昇せしめることは、木炭量約 100kg の節約となるものであつて、送風量と予熱温度が熱風顕熱量に及ぼす影響を線図で示すと第4図の通りとなる。この線図は実際作業の一基準となるものである。

[VI] 結 言

以上、これを要約すると次の如くなる。

- (1) 砂鉄精錬用 5 ton 木炭銑角炉の作業改良前の熱精算よりその実態を検討した結果、炉内は比較的有効に全部が利用されており、炉内効率良好であるが、損失熱量の最大は炉頂ガスの持去る熱で損失熱中の 70% にも達する。次で問題になるのは、朝顔部以下での熱損であり此の部分の温度上昇を企図しなければならない。
- (2) 熱風温度を上昇すればする程必要空気量は減じ木炭消費量も減じ得るが、これは特に 400°C までは空気量及び木炭量の低下率は急速である。
- (3) 炉操業に於て、最も問題となる送風量—木炭量の平衡恒数 K を導入し、上述の熱風温度の上昇は常に $K = 3.96$ 以下に於て行うべきであるとした。
- (4) 実測炉内ガス組成を Boudwerd 曲線に対比せしめ考察した結果、炉内ガス流速の低下を図ることの重量性が指摘される。送風量の増減によつてこれに対しても、上述の K 恒数の制約があり、酸素富化、熱風温度上昇、朝顔以下の熱損の防止等があげられるが、根本的には装入材料の予備処理、炉型の改良を企図せねばならない。
- (5) この種小型炉では、炉内炭素沈積は殆ど起らないことを指摘した。これは大型炉との顕著な特異性の一つである。

終りに臨み、本研究は、前工場長菊田多利男博士の御指示により発足した木炭銑委員会、矢野主査初め、委員の方々及び研究所長小柴博士の御援助によつて為されたものであり、又東大芥川博士の直接の御指導に負うところも大きい。こゝにこれら諸氏に対し深甚なる感謝の誠を捧げるものである。

参 考 文 献

- (1) 中村信夫：砂鉄精錬に関する研究(第1報)、日立評論、33, 2 (1951), 40.

高 速 度 鋼

日立製作所冶金研究所長 小柴定雄 著
工 学 博 士

(誠文堂新光社刊)

A 列5判 230 頁 美装クロス箱入

販売

日 立 評 論 社

定価 250 円 ㊦ 32 円

最近に於ける日立製作所社員社外講演一覧 (昭和 27 年 9 月分)

講演日	主 催	演 題	所 属	講 演 者
7/31	職業指導講座	工場経営者側より見た少年工に対する希望所感	戸塚工場	市 川 暉
//	//	健全なる労働組合の話	//	太 田 文 平
10/5	鋳物協会秋期	鋳物工場に於ける電動工具の利用について	日立工場	大 坪 弘 一
8/19~21	電力合理化講習	渦巻ポンプ取扱法について	本店	円 岡 始
8/21	アシナリー	板金材料の扱方	戸塚工場	岩 間 喜 吉
8/20	建設機械化夏期	ショベル、タワーエキスカベータ	亀有工場	安 河 内 春 雄
11/2~3	日本金属学会	数種軸受材料の耐磨耗性について	中央研究所	南 波 栄 吉
11/2~3	日本鉄鋼協会	黒心可鍛鋳鉄に於ける焼鈍時の脱炭の影響	深川工場	藤 井 恒 彌
11/2~3	日本金属学会	$A\gamma$ 変態機構の磁気的研究 (第 4 報、第 5 報) Subzero Cooling に於ける γ_R の分解様相について	日立研究所	小野健二、根本 正
9/3~4	色彩調節講演	安全と彩色	亀戸工場	山 田 正 臣
10/3	機 械 学 会	周波レスポンスによるタービン調速機特性解析	日立工場	古賀善雄、桑野幸三
//	//	横型水車による「インデックステスト」法の実験	日立研究所	山崎卓爾、手島友亮
//	//	日立汽罐自動燃焼制御装置	日立工場 多賀工場	泉 千 吉 郎 北 川 栄 紀
//	//	欧州の工作機械の趨勢について	日立工場	守 田 紀
11/7	精機学会他三学 会連合	引抜時に於ける摩擦実験	日立電線工場	柿崎公男、久本 方
10/9~10	応用物理学会	熱可塑性高分子物質のレオロジーと押出加工性 第 2 報 (塩化ビニルの可塑性と可塑性計粘度)	//	山 本 三 郎
9/27	電顕学会関東支 部	検鏡法の発達を中心として見た電子顕微鏡の応 用研究	中央研究所	土 倉 秀 次

特 許 紹 介

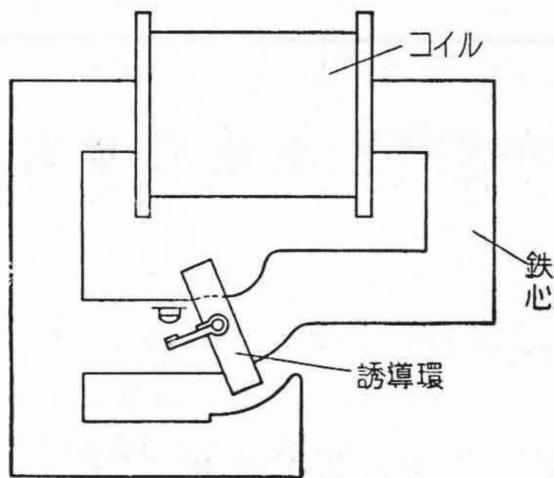
特 許 第 193062 号

西堀 博・北川 榮・猿渡房吉

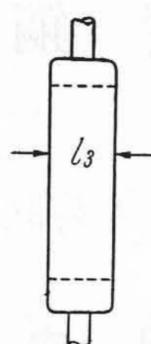
誘 導 環 型 継 電 器

従来第 1 図に示す如き誘導環型継電器の誘導環は、上下左右各辺共に同一肉厚のものを使用しているのが、この発明は誘導環の両側辺の肉厚を可及的に小となし、このために生ずる電気抵抗の増大は上下両辺の肉厚を大となして補ったものである。

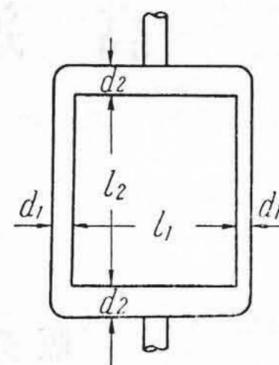
誘導環の慣性能率は理論的計算によれば l_1, l_2, l_3 (第 2 図) 及び 第 3 図参照) を一定とすれば、 $l_1 + 2d_1$ の値によつて大きな影響を受け、これに比べれば d_2 の影響は極めて少い。この発明は上記理論より、両側辺の肉厚 d_1 を小さくすることによつて誘導環の慣性能率を有効に減少せしめることに成功し、極めて高速度で動作する継電器を得たものである。(田 中)



第 1 図



第 2 図



第 3 図