

低周波誘導炉と鑄鉄溶解技術

Hitachi Low Frequency Induction Furnace and Cast Iron Melting Operation

鑄鉄溶解用としての低周波炉の動向並びに溶解作業に関する留意点について報告する。

最近の電力事情から本炉の普及は停滞気味である。しかし公害規制、熱効率、あるいは鑄鉄品質面から将来は更に普及するであろう。溶解装置としては大形化、予熱炉の使用が増加する。

溶解作業上は、加炭材の選択が重要になる。これは加炭材の種類によりそれに含有される窒素量が **trace** から **1%** の範囲にわたるためである。鑄鉄中で窒素は強化元素として作用するので **C**、**Si** と同様 **N** の管理も材質安定化には必要である。

炉のライニングの差異も材質に影響する。一般に酸性ライニングのほうが中性ライニングに比べて軟らかい材質になりやすい。

P、**S** など微量元素が材質に及ぼす影響も大きい。これは原材料の選択に自由度の大きい低周波炉操作ではなおさらである。

岡田千里* *Senri Okada*

中江秀雄** *Hideo Nakae*

磯部昭二*** *Shôji Isobe*

1 緒 言

鑄鉄の溶解は、従来主としてキューポラにより行なわれてきたが、近年に至り低周波炉の占める割合が急増してきた。現在は、電力事情の関係でこの増加は停滞状態にあるが、将来を見通した場合には更に伸びるものと期待される。

このことは、(1)低周波炉の装置上の改善、(2)耐火材料の発達に伴う安全性の向上、(3)溶解作業が簡単で成分調整が容易なこと、(4)溶解時に塵埃、有害ガスの発生が少ないことなどの利点によるところが大きい。

しかし、キューポラの場合と比較して低周波炉で鑄鉄を溶解する場合、原料地金として鋼だけを用いても操作が容易であるなど、操業上の自由度が大きい。このため、目標成分（主に **C**、**Si**）を従来のキューポラ溶解の場合と同様にしても、低周波炉溶湯はキューポラ溶湯と異なった性状のものが得られることが多く経験された。

そこで低周波炉で鑄鉄溶解を行なう際の一助となるよう、本炉及び溶解技術について最近の動向と操業上の二、三の要点を取りまとめ以下に述べる。

2 低周波炉の動向

2.1 大形るつば炉

電磁誘導によるジュール熱を利用し、金属の加熱及び溶解を行なおうとする考案は既に1880年代から存在した。溝形誘導炉、あるいはるつば形誘導炉の発明は1920年前後であるが、近年に至りコンデンサ製作技術の進歩、コイルに使用される特殊断面形状の銅管成形技術の進歩から急速な発展を見るに及んだ。

最近はしだいに製作実績が積み重ねられてきたため、逐次大容量化の傾向にある。例えばヨーロッパにおいては炉容量 **60 t** という大形のるつば形炉が出現している。このような状況にかんがみ、日立製作所では社内の鑄造設備に **15 t** るつば形低周波炉を製作、設置している。

本炉の仕様は表1に、外観は、図1、2に示すとおりであ

る。炉が大形化した場合、ライニングの膨張が相対的に大きくなり、これに対する特別の配慮が必要になってくる。本炉では、るつばの外殻をシェル状にして膨張力を抑えている。また、ライニング焼結時に生ずる軸方向の膨張、使用中のライニングの膨張に対処するため特殊スプリングを装着している。

図2は、本炉のレイアウトの一例を示すものである。本炉は1時間当たり **4.5t** の溶解速度であるので、同程度能力のキューポラを設置する場合の面積より若干広い面積を必要とするかもしれない。しかし、キューポラに要する熱風装置及び完全な除塵設備までを含めて比較すれば、設備費用、設置面積の両面から考えて有利と言えるであろう。

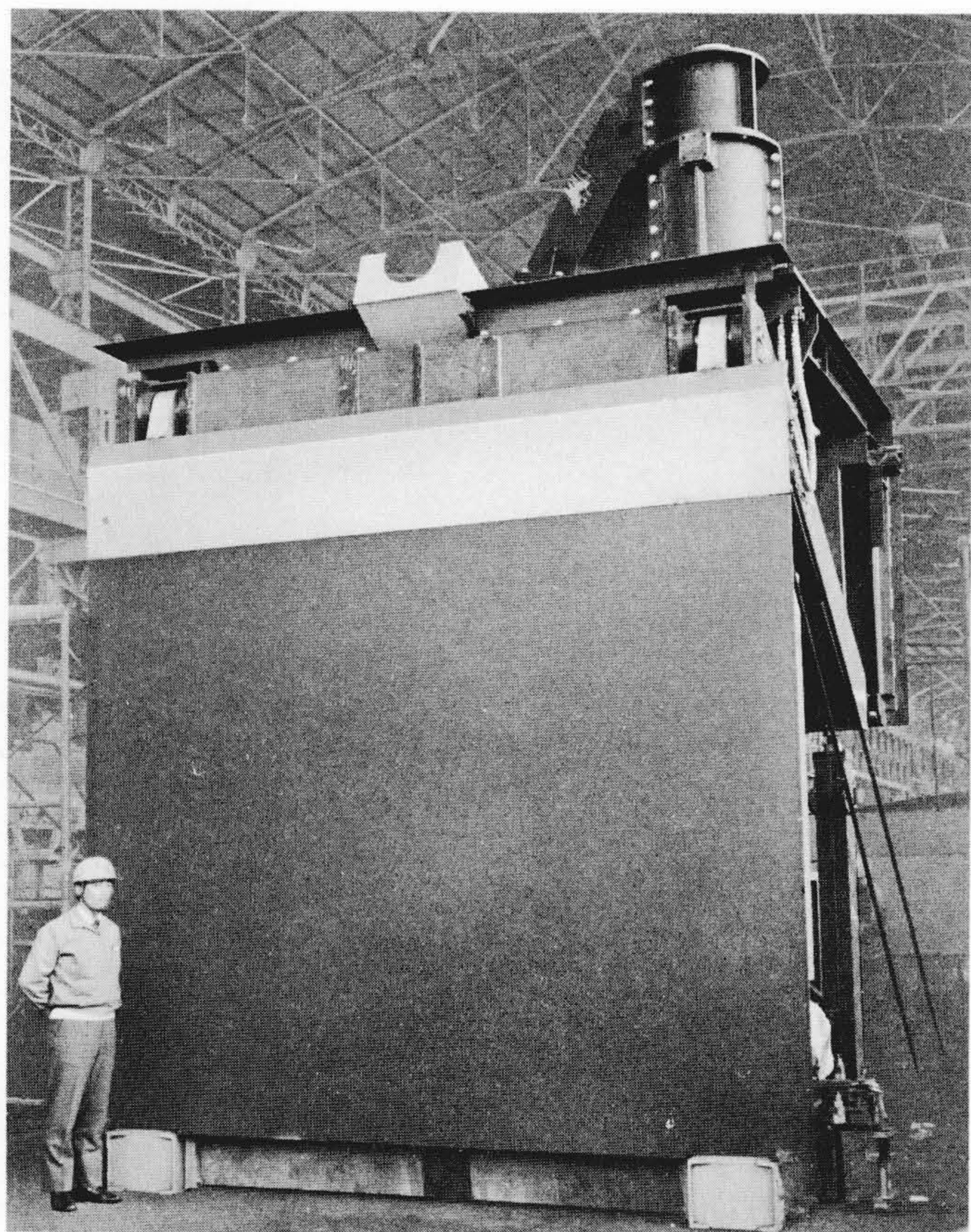
2.2 溶解コストと予熱効果

溶解コストを考える際には炉の熱効率、熱源の価格、使用される溶解原料、副資材、及び人件費などが問題となる。

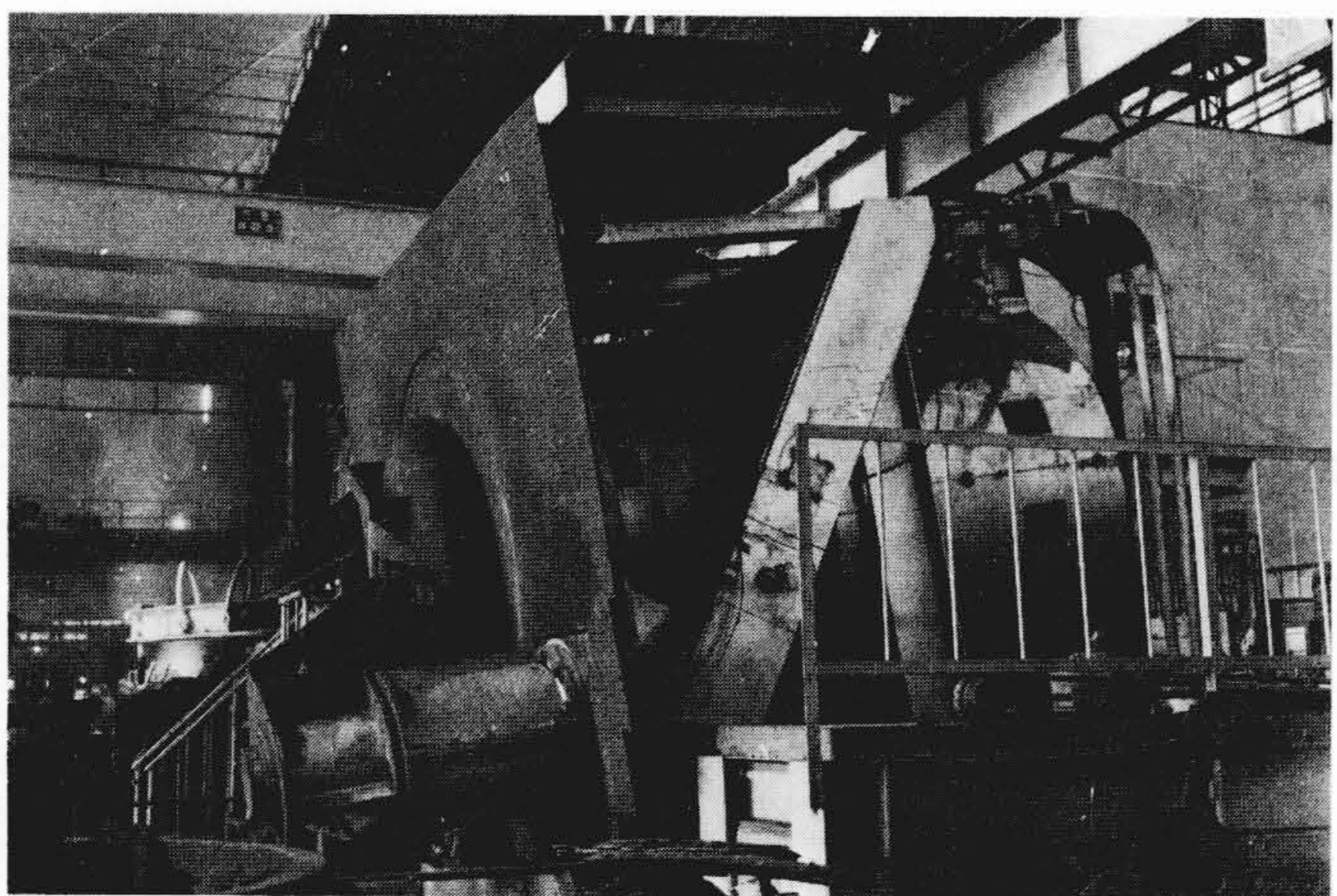
表1 15 t 低周波誘導炉仕様 溶解能力、消費電力は、炉が十分熱せられた状態で、 $\frac{1}{2}$ 残湯、連続溶解の場合で示す。除滓、測温などの時間は含んでいない。

形 式	LF-TI5000	
溶 解 材 質	鑄鉄、ダクタイル鑄鉄	
炉 入 力	定 格 入 力	2,500kW
	許容最大入力	3,000kW
炉 容 量	定 格 容 量	15,000kg
	最 大 容 量	16,500kg
溶 解 能 力	1,450°C	4,500kg/h
消 費 電 力	1,450°C	555kWh/t
所要冷却水	530l/min	
傾 動 方 式	油圧押上式、全傾100度/120s	
炉 蓋	油圧旋回	
築 炉	酸性ライニング材、乾式ラミング方式	

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士 *** 日立製作所国分工場



(a) 炉体を取り出した状態



(b) 傾動時の外観

図1 15t低周波誘導炉外観 ライニングの膨張に対処して、外殻はシェル状にしてある。

熱効率に関しては、キューボラ、アーク炉と対比して図3のような結果が報告されている⁽¹⁾。これによると、低周波炉は溶湯の加熱に対して極めて効率が良く、溶け落ちまでの加熱に対しては、アーク炉が若干優れているが、各炉に大差はない。このような熱効率上の特徴から、キューボラと低周波炉との二重溶解、あるいは低周波炉原料の予熱が考えられるようになってきた。

原料の予熱効果に関して、アメリカでの報告によると、熱効率30%以上のガス炉を用い760℃まで原料を予熱した場合、約2ドル/t溶解コストが低下すると言う⁽²⁾。また、原料予熱は溶解能力の増大にもつながり、760℃の予熱で能力は約60%向上すると言われており⁽³⁾、今後は電力不足事情とあいまっ

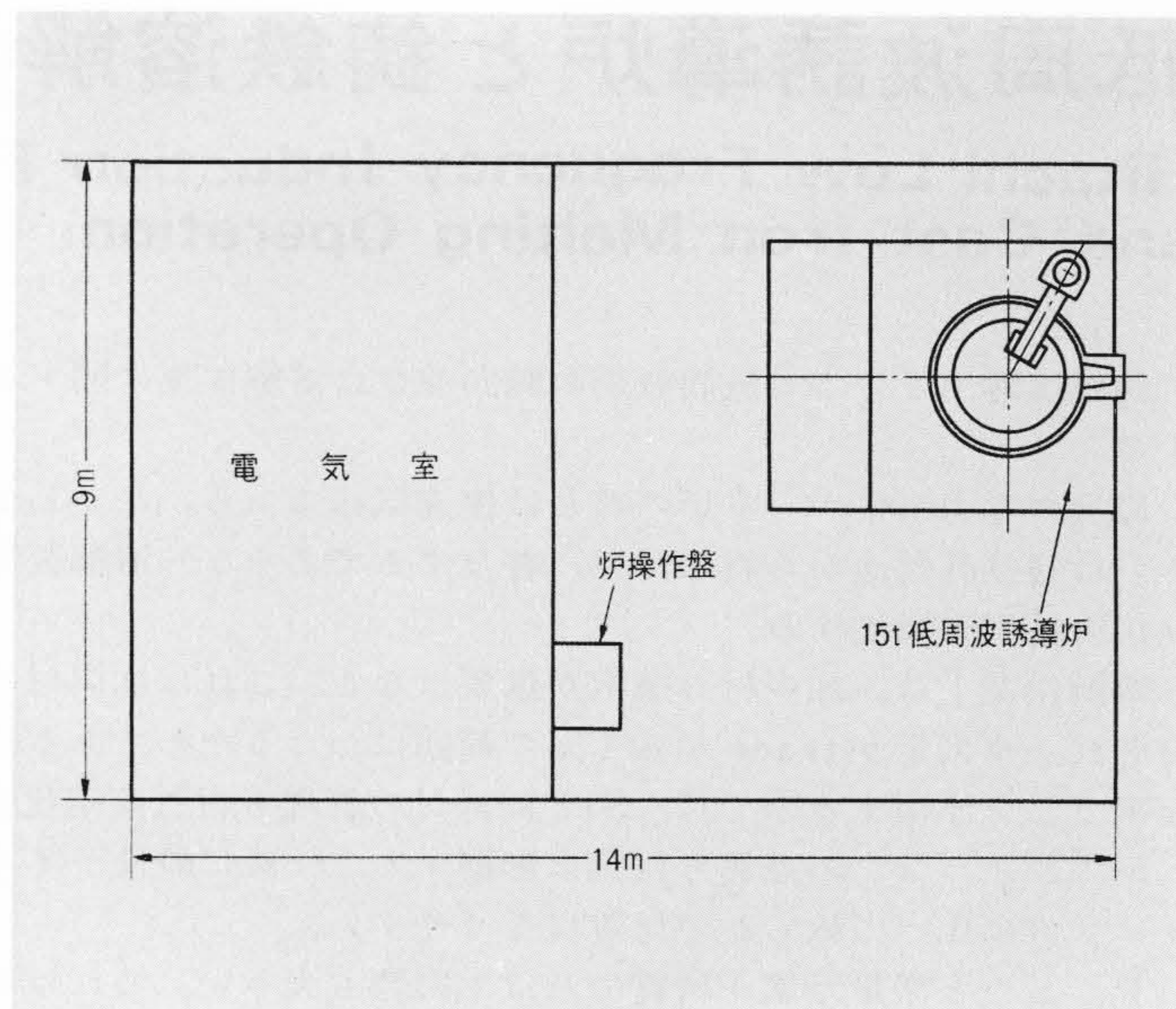


図2 15t低周波誘導炉のレイアウト例 炉の設置に必要な面積の概略を示したものである。

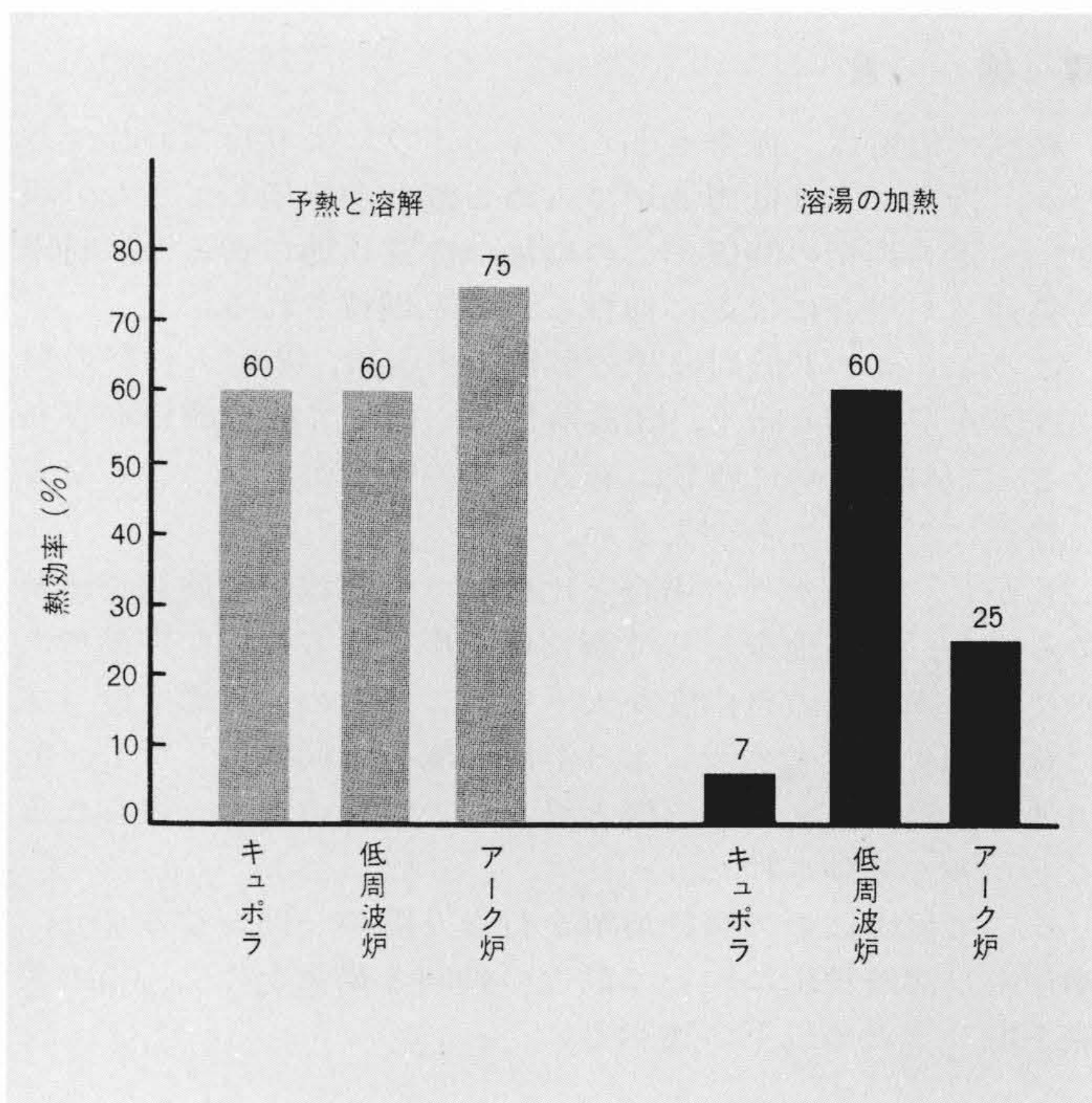


図3 各溶解炉の熱効率 溶け落ち後は低周波炉の熱効率がとびぬけて良い。

て原料予熱がますます一般化するものと予想される。

そこで、昭和49年6月の平均コストから低周波炉及び冷風キューボラの溶湯コスト(設備償却費を除く)を比較してみると図4に示すようになる。これにより溶湯コストは、低周波炉のほうがキューボラよりも約15%も低いことが分かる。これに低周波炉溶解での溶湯管理の容易さ、材質上の利点を加味して考えれば、今後低周波炉はますます普及するものと予想できる。

3 鑄鉄溶解上の留意点

概して、低周波炉溶湯はキューボラ溶湯に比べ強く、硬く、またチル化しやすいと言われる^{(4)~(6)}。図5に示すように、原材料中の鋼配合率が鑄鉄の強さに及ぼす影響が大きい⁽⁴⁾。こ

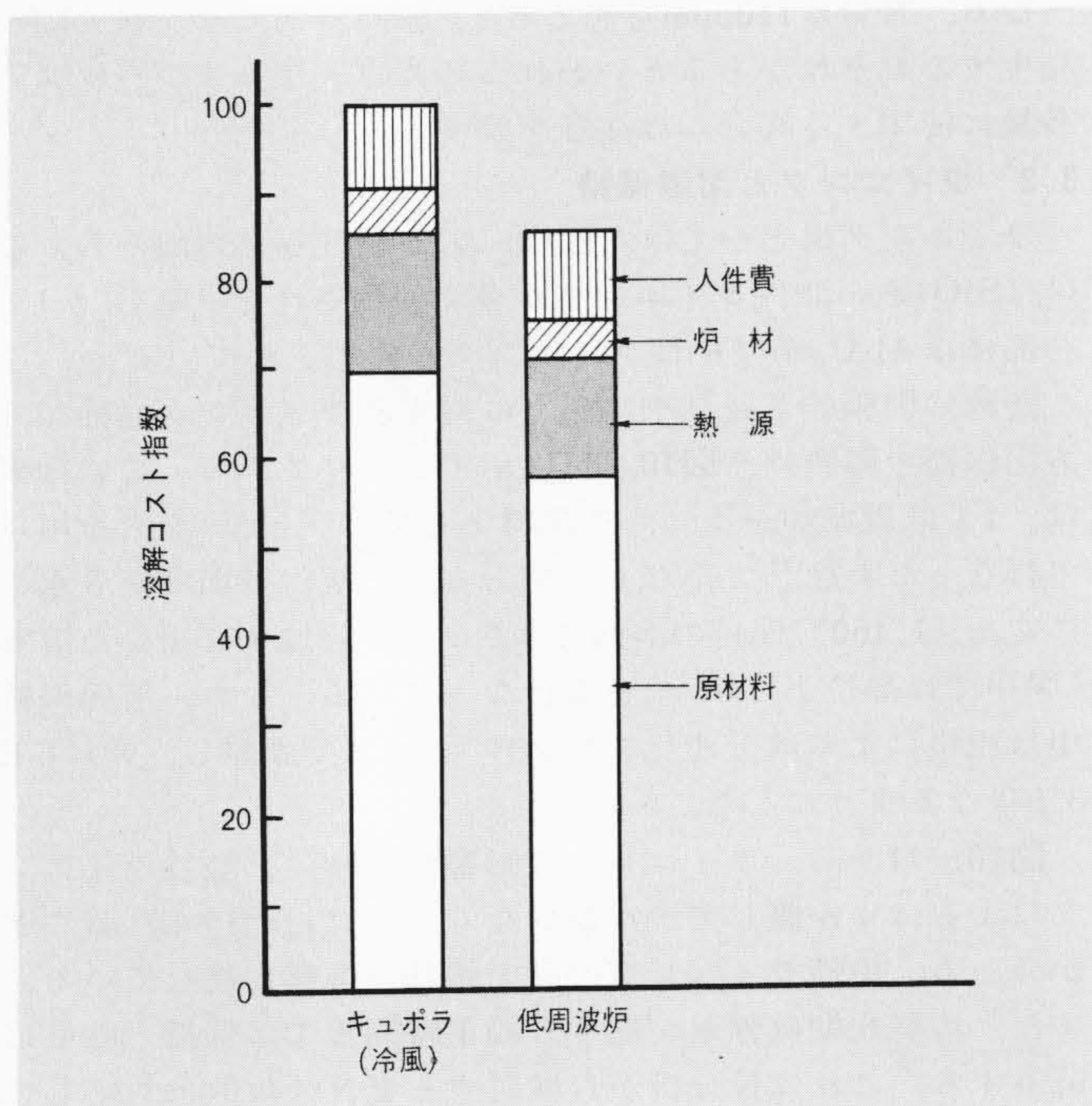


図4 溶解コストの比較(昭和49年6月) 電力8.8円/kWh, コークス36円/kg, 低周波炉では原材料に銑鉄の配合なしで計算した。

これらの傾向は普遍的なものではなく、溶解操業条件に依存するものである。従って、適性操業を行なうことで溶湯特性を要求に合致するものにすることができる。

3.1 加炭材の選択

一般に使用されている加炭材中には、窒素(以下、Nで表わす)含有量が1%程度に達する高Nのものが含まれている。鑄鉄の材質に対して鑄鉄中に含まれるNの影響が大きいことは既に認められている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。そこで鑄鉄中のNに着目して行なった実験⁽⁹⁾について、また加炭材選択指針について併せて以下に述べる。

加炭材にピッチコークス(約0.6%N)を用いた低周波炉溶湯中のN量と、原料中の鋼配合率との関係は図6に示すとおりである。鋼配合率を高めると加炭量を増す必要があるため、同図で横軸は加炭量に置き換えることができる。すなわち、加炭材が増すと溶湯中のNが高くなる。この結果から、低周波炉溶湯が鋼配合率の影響を受けやすいことなどの特徴をもたらす一因として溶湯中のNを挙げることができる。

次に鑄鉄の材質に及ぼす加炭材の影響を調査した実験結果について述べる⁽⁹⁾。ここで取り上げた加炭材は、電極黒鉛(tr of N)とピッチコークス(0.63%N)である。

実験には100kg塩基性中周波炉を用い、鋼配合率70%で行なった。溶湯は1,520°Cに昇温後、炉中で50分間保持し、その間随時試料を採取した。溶解は炭素当量(以下、CEと略す)値で3水準、加炭材2種類で、計6回行なった。

引張強さに対する加炭材及びCE値の影響は、図7に示すとおりである。同図では各溶解ごとに記号を変えて示し、各溶解の中では、溶解初期にCEが高く、時間経過とともにCEが低くなっている。同図から、引張強さは加炭材の種類に強く影響され、ピッチコークスで加炭したもののほうが強いことが分かる。しかし、ピッチコークスで加炭した溶湯は、溶解初期にCE値が高いにもかかわらずパーライト組織であり、保持とともにフェライト組織になる。基地組織の変化により強さは低下するが、同じフェライト組織でもピッチコークス

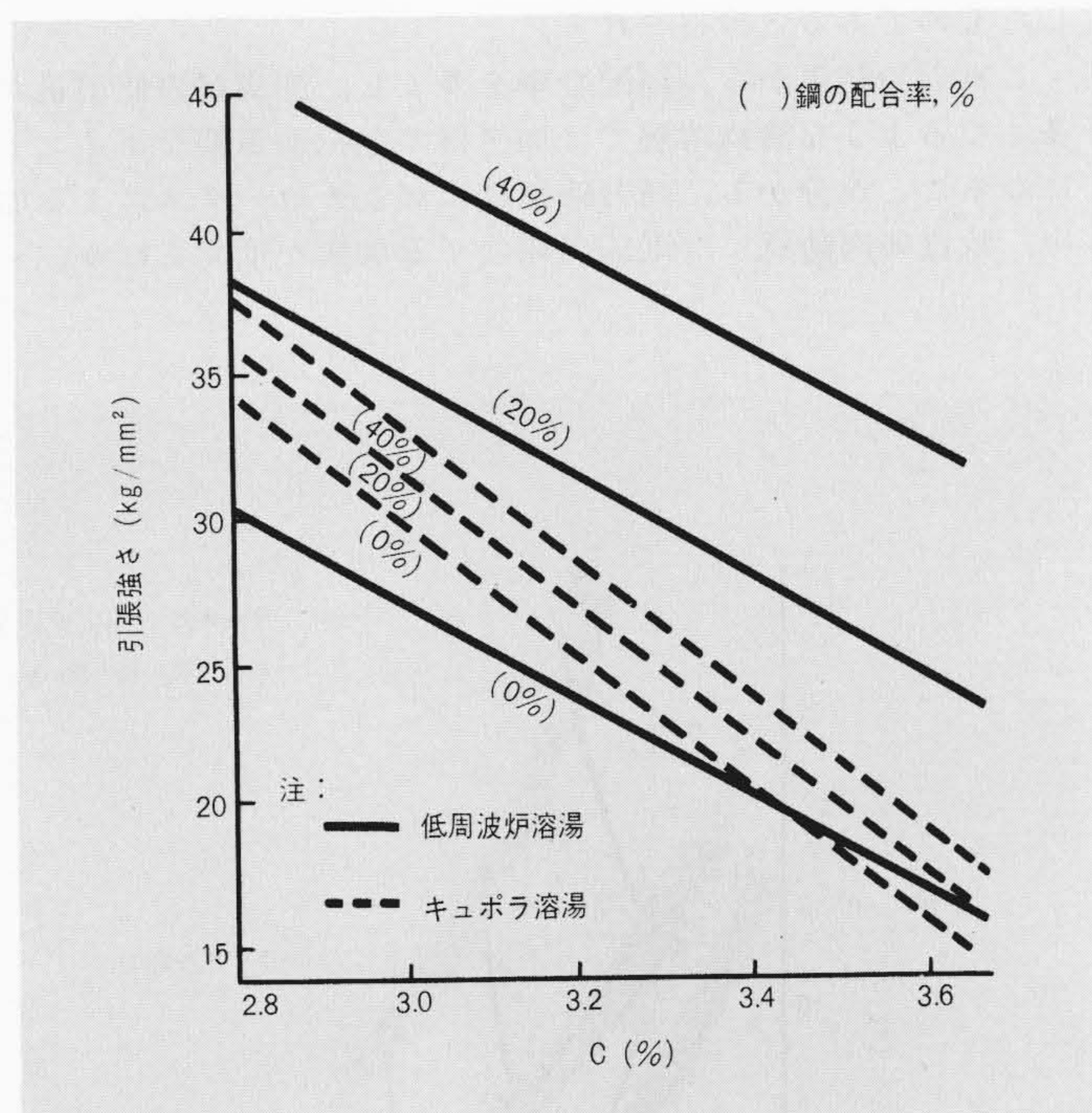


図5 低周波炉溶湯とキューボラ溶湯の引張強さの比較(2.14%Si) 両溶湯とも各約60例の重回帰分析から求めた。

加炭のほうが強さは高い。

図8は、チル深さの変化を示すものである。チル深さにも加炭材の影響が示され、ピッチコークスで加炭した溶湯のほうがチル化傾向が強い。この傾向はCE値が高いほど顕著である。

図9は、N量の変化を示すものである。ピッチコークスで加炭した溶湯は、電極黒鉛で加炭したものの約2倍のN量となっている。この結果から、加炭材中のNが鑄鉄溶湯中のN量に大きく影響を及ぼし、これが溶湯の性状に差異をもたらす

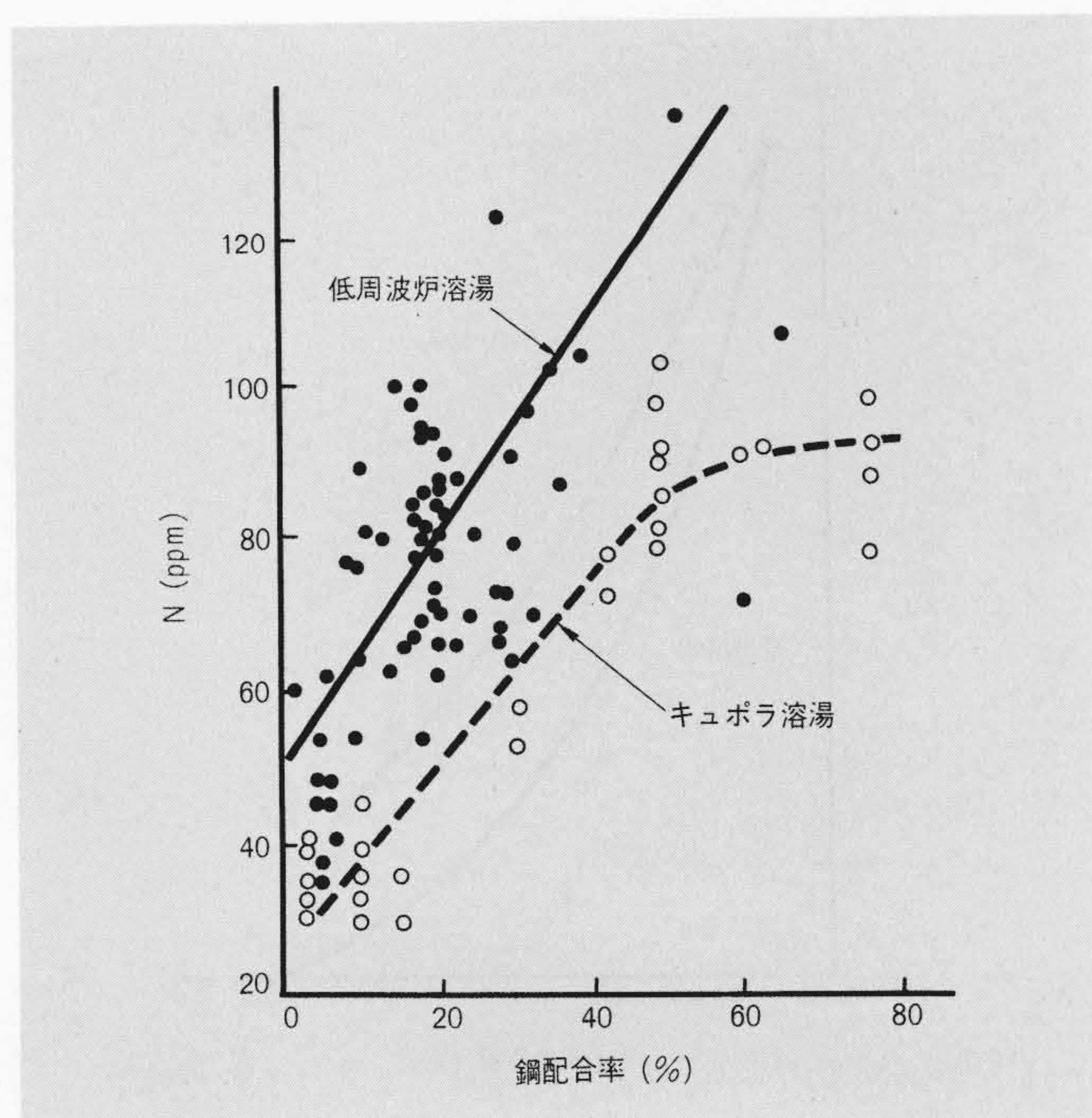


図6 溶湯のN含有量に及ぼす鋼配合率の影響 低周波炉ではピッチコークスで加炭。材質は、FC20~FC30。

したものであると推察される。

これらの結果から、鋼配合率を多くし、加炭材の使用量が多くなるような鉄溶解では加炭材の選択が重要なポイントになることが分かる。高力鉄にはピッチコークスによる加炭、軟質薄肉鉄には電極黒鉛による加炭が推奨される。

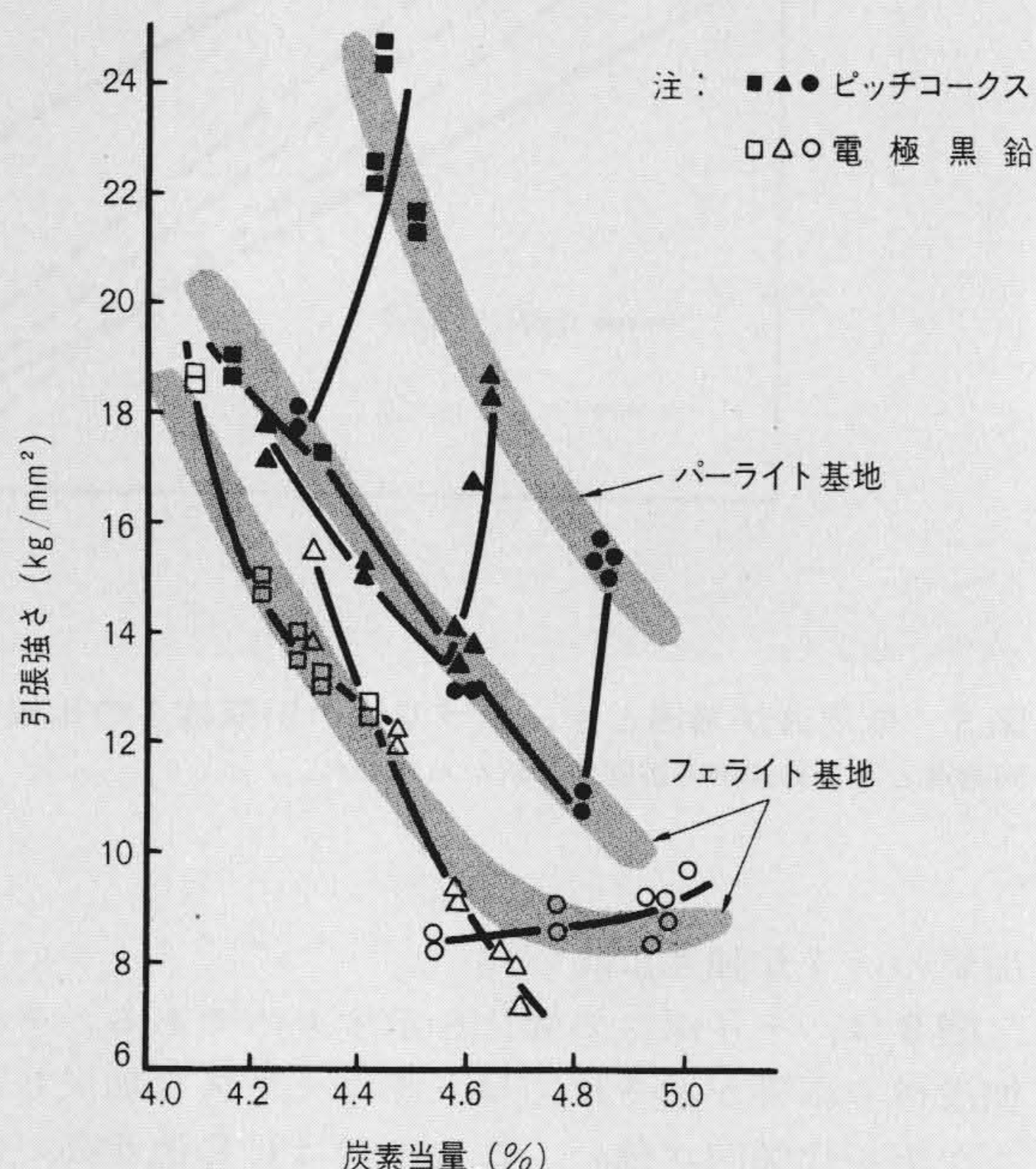


図7 引張強さに対する加炭材の影響 6溶解の結果で、各溶解ごとに実線で結んである。

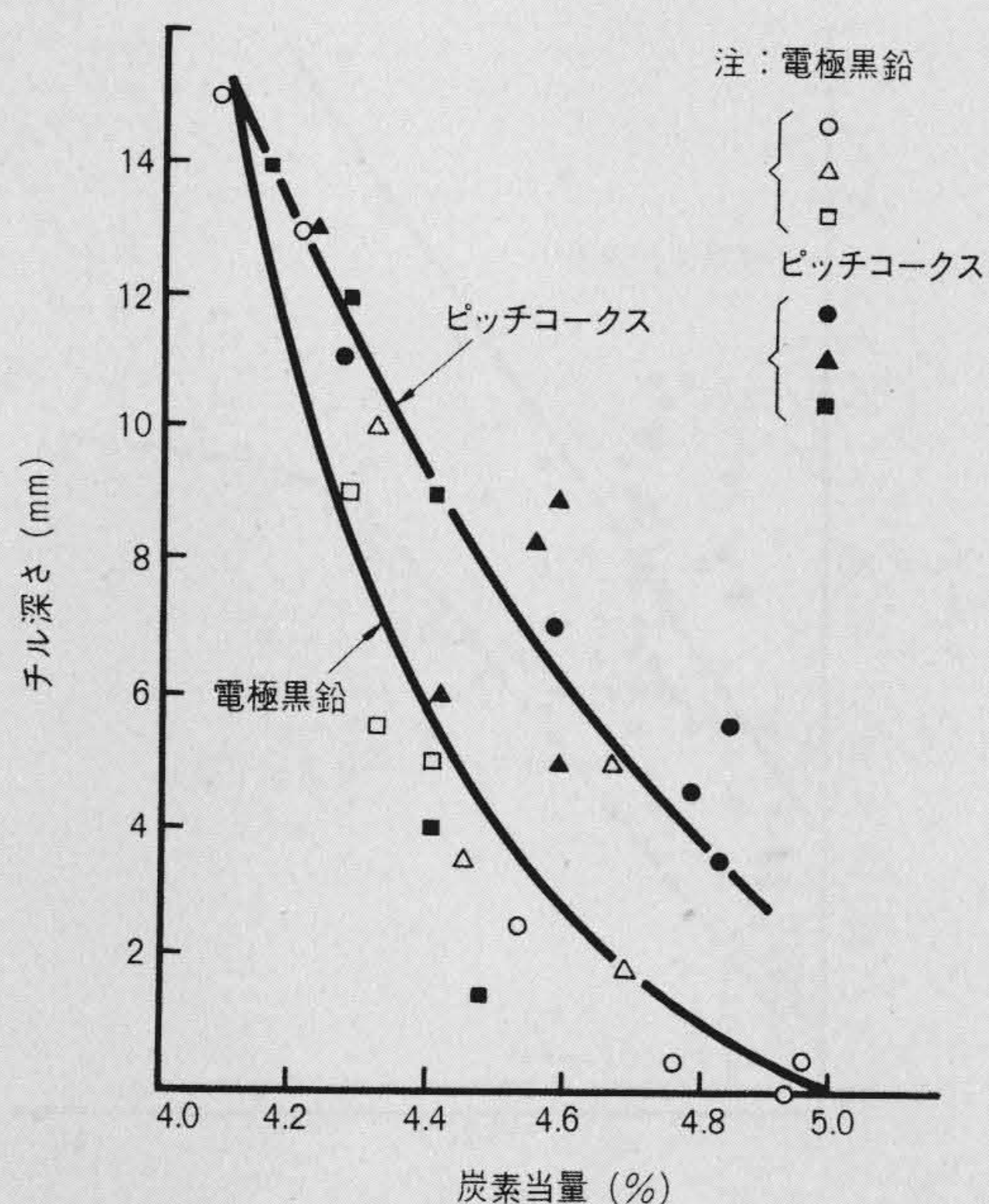


図8 チル深さに対する加炭材の影響 1,500°Cで50分間保持した間に随時試料を採取した。

なお、N量が110ppmを超えると、厚肉铸件にザク状欠陥が発生するおそれがあるといわれるので⁽¹⁰⁾、ピッチコークスを多量に使用する場合には注意を要する。

3.2 ライニングと溶湯保持

ライニング材としては、価格、耐き裂性などの面から一般にはSiO₂系の酸性ライニングが多く使用されている。しかし、一部にはAl₂O₃系の中性ライニングも使用されている。

鉄の引張強さ及びチル深さに対するライニング材種類、溶湯保持の影響は、図10、11に示すとおりである。この結果は、1t低周波炉を用い、加炭材としてピッチコークスを用いて行なった実験⁽¹¹⁾で得たものである。溶解保持温度を3水準に変え、1,460°C保持の溶解ではさびの多い地金を用いた溶解(図中では品位下と示す)をも行なっている。なお、溶湯保持中は脱炭による成分変化をピッチコークスで調整し、常にCE 3.9になるようにした。

図10、11から、ライニングの影響を見れば、酸性ライニングによるほうが概してチルが少なく、軟質材が得られることが分かる。中性ライニングは高力鉄の溶解に適している。また、溶解初期は強さが高く、約1時間までは保持とともに低下する。これはN分析から検討するとNの放散に対応している。

なお、溶湯を保持したとき、Cは酸化消耗するが、Siは酸化消耗する場合と、ライニング材中のSiO₂がCにより還元され増加する場合とがある。図12は、保持中のSi量の変化を示すものである。これによると、中性ライニングの場合、Si量は一定か、又は減少する傾向にあり、酸性ライニングの場合は増加する傾向が認められる。溶湯保持の長い作業ではこの点についても留意する必要がある。

3.3 微量元素の影響

上述してきたように、鉄の特性に対しNの影響は大きい。従って、Nと親和力の強いTi、Zrなどの影響は無視できないものと考えられる。

過共晶鉄(3.6%C, 2.9%Si, 0.3%Mn)に対するZr添加

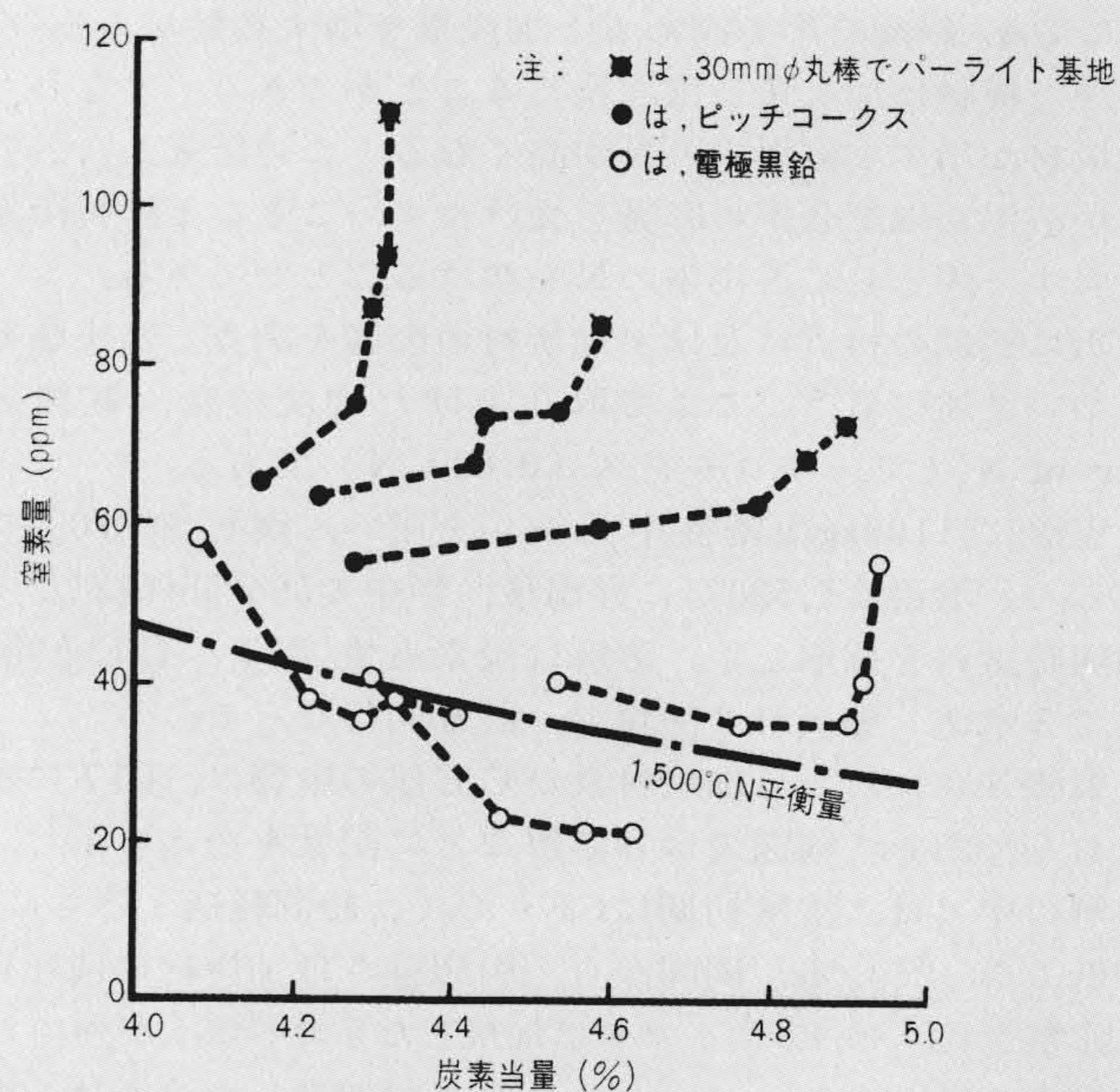


図9 N量に及ぼす加炭材と炭素当量の影響 鎖線で結んだものは、それぞれひとつの溶解で炉中50分まで保持したときの変化を、一点鎖線は、Darkenの式から求めた平衡値(3%Si, 0.3%Mn, 0.03%P, 0.05%S)を示す。

図10 引張強さに及ぼすライニング種類及び溶湯保持の影響
鋼配合率25%, ピッチコークス加炭,
1 t 低周波炉による実験結果によるものである。

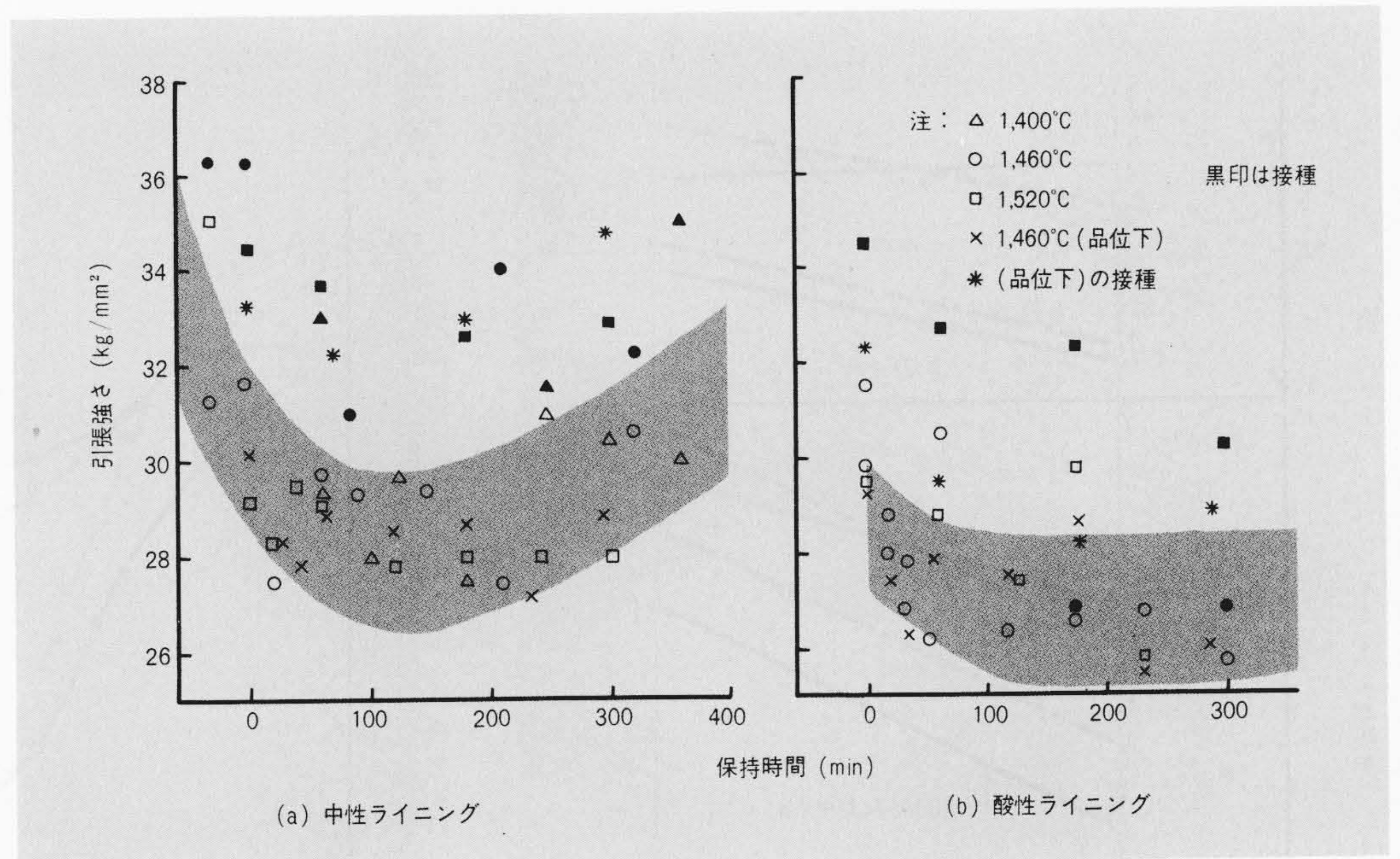


図11 チル深さに及ぼすライニング種類, 溶湯保持の影響
酸性ライニングでのほうがチルが少ない傾向にある。

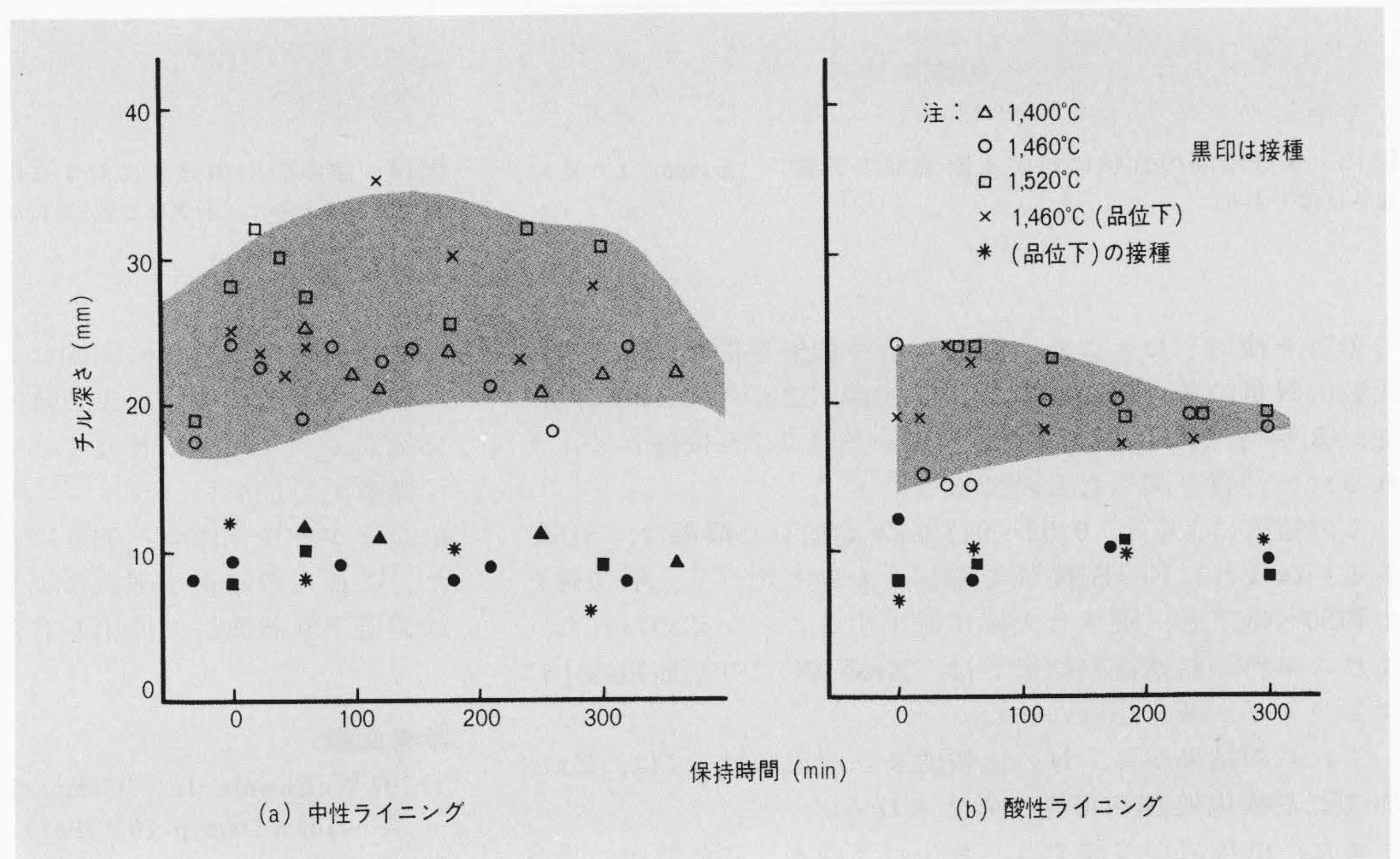
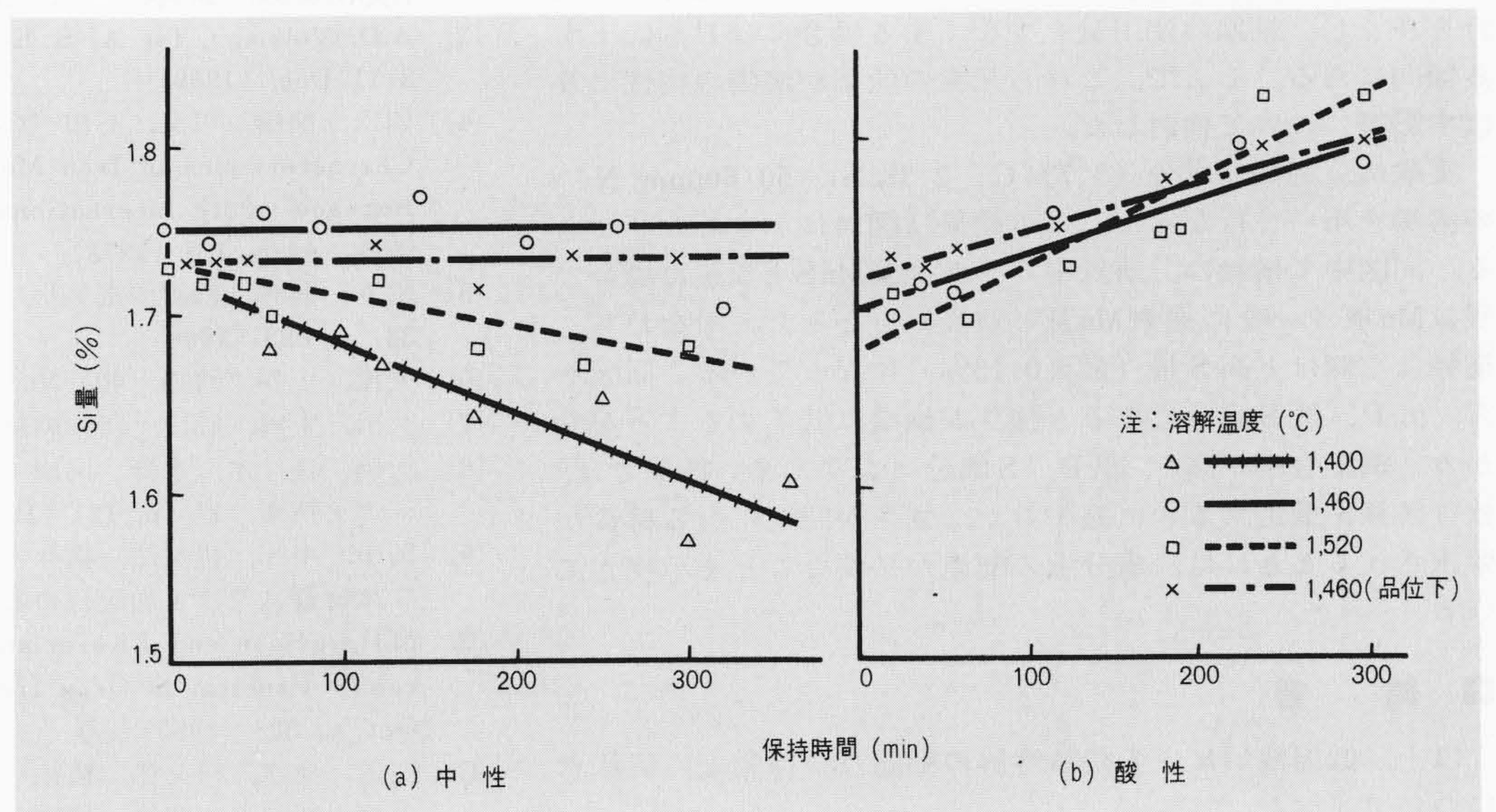


図12 Si量の時間的变化 中性
ライニングではSiは減少する傾向にあるが、酸性ではその逆になる。



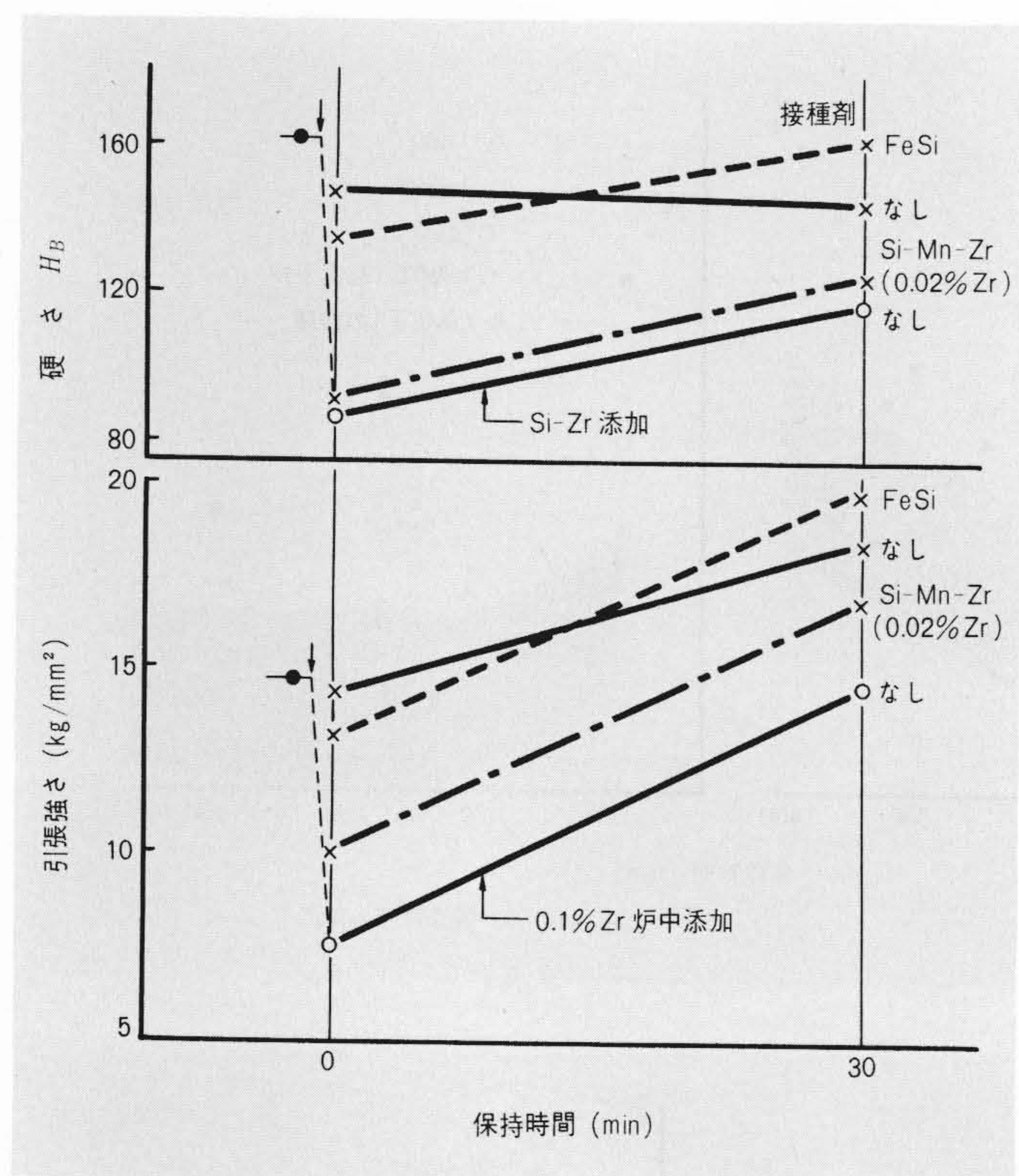


図13 鑄鉄溶湯の性状に対するZr添加の影響 Zr添加により硬さ、強さは低下する。

の影響を検討したところ、図13に示す結果を得た。本実験は比較的N量の多い溶湯に対し、(1)元湯、(2)炉中でZr0.1%添加、(3)炉外でZr0.02%添加、(4)Fe-Siを0.3%接種して、それぞれの性質を調べたものである。

この結果によると、0.02~0.1%Zr添加した溶湯は、元湯、あるいはこれにFe-Si接種を施したもの比べて、引張強さで約50%低下し、硬さも大幅に低下することが認められた。これら試料の組織観察結果では、Zr添加により基地組織中にフェライトが多く認められた。

これらの結果から、Nの比較的多い溶湯に対しては、Zr添加による軟化処理が可能と考えられる。

また、低周波炉溶解では、キューボラのように溶解中の吸S現象が少なく、一般に低Sの溶湯になりやすい。更に、鋼配合を多くし、銑鉄の使用量を少なくする場合にはPも低下する傾向にある。そこで、これら元素の低下が溶湯の特性に及ぼす影響について検討した。

実験は、過共晶成分(3.7%C, 2.3%Si, 50/60ppm N)の溶湯を用いて行なった。この結果は図14に示すとおりである。同図中で横軸は、鑄鉄中のSが全量MnSとなった場合の残量Mn量(一般に過剰Mn量と言う)をとった。すなわち、横軸は左側ほど高S量(最大0.13%)になっている。同図から、低P、低S成分になると強さが極端に低下することが分かる。鋼配合率が高く、低P、S成分になりやすい操業では、軟質鑄鉄を製造するのに適するが、強さが問題になる材質が要求されるときには、成分上の配慮が必要なことを示唆している。

4 結 言

以上、低周波炉による鑄鉄溶解の動向及び操業上の留意点について述べた。

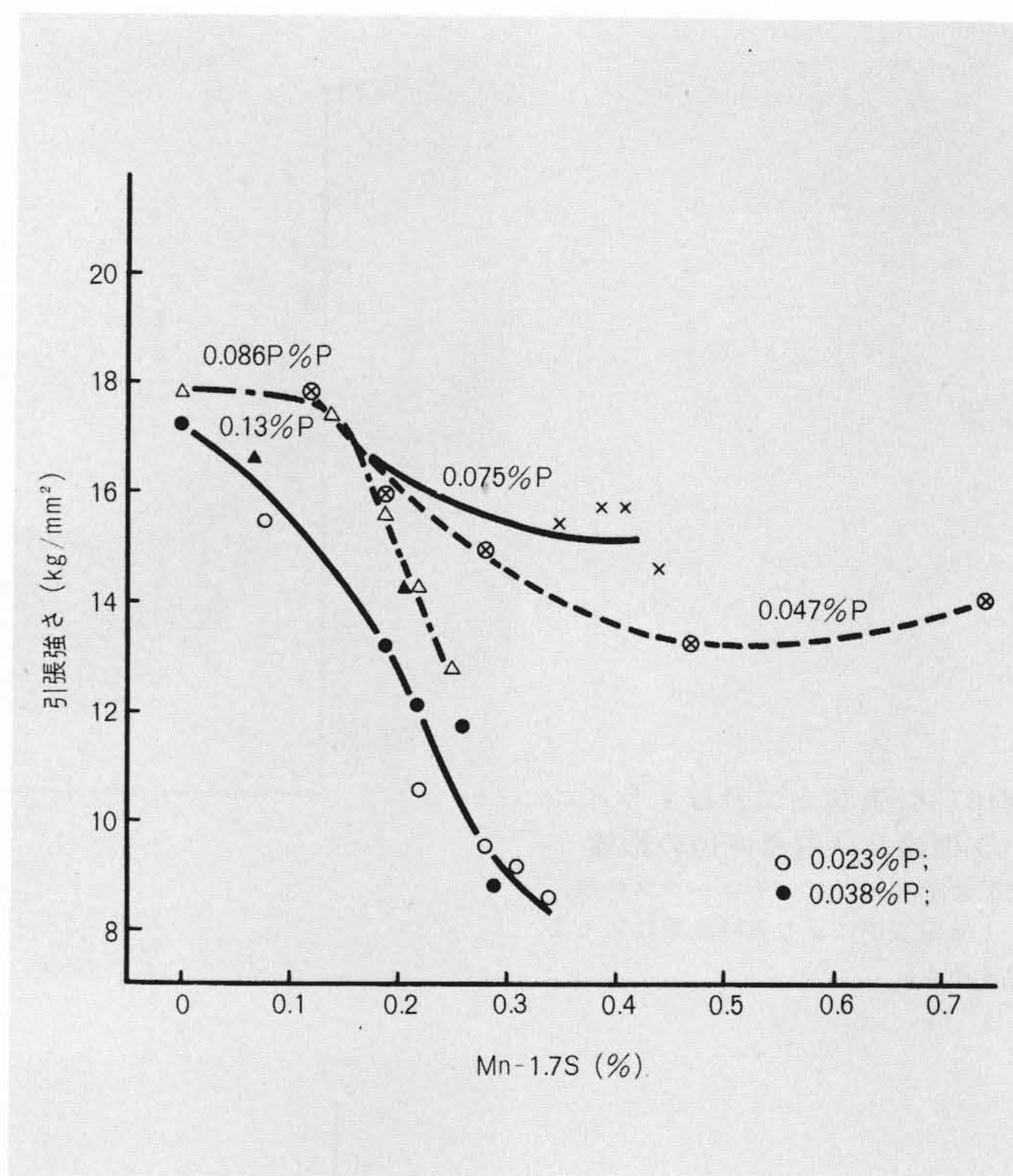


図14 鑄鉄の引張強さに対するP, S, 過剰Mn量の影響 横軸をS量に置き換えると、右側ほど低S量になる。

低周波炉は大形化の傾向にある。溶解費は電力費が高騰した現在でも低周波炉によるほうが、キューボラによるよりも約15%安く、今後更に普及するものと思われる。

操業上、加炭材、ライニングの種類、Zr処理、P、S含有量などがチル化傾向、強さに及ぼす影響について明らかにした。これらの適正な選択により、高力鑄鉄、あるいは軟質鑄鉄製造上低周波炉の使用が有効なことが明確となった。

参考文献

- (1) H.W. Lownie Jr., "Comparing Melting Energy Costs" Foundry, Dec. p. 76 (1967)
- (2) J.E. Rehder, "Modern Iron Melting Techniques and Their Application" Modern Casting, Jan. p. 51 (1967)
- (3) A.D. Volkmar, 1st AFS Electric Iron Melting Conf., 8-11 Dec. (1969)
- (4) 岡田, 前橋, 川又, 石田 "Control of Iron Melting and Characteristics of Iron Melted in a Coreless Induction Furnace", 38th International Foundry Cong. No. 4 (1971), 鑄物, 44 p. 107 (1972)
- (5) 根本, 若林 "低周波電気炉による鑄鉄溶解法の研究", 鑄物, 38, p. 823 (1966)
- (6) 矢作, 上谷: 鑄物 40 No. 3 p. 136 (1968)
- (7) 久恒, 上田, 篠田 "新強靱鑄鉄の研究" 鑄物, 25 p. 20 (1953)
- (8) 大橋, 佐々木, 水野, 岡田: "ねずみ鑄鉄中の窒素について" トヨタ技術, 21 p. 121 (1969)
- (9) 岡田, 中江, 祖父江, 横井 "誘導炉で溶解した薄肉鑄物用鑄鉄の材質に及ぼす加炭材の影響" 鑄物, 45 p. 896 (1973)
- (10) M.H. Davison and J. Keverian, "Solution to a Nitrogen Porosity Problem in Gray Iron Casting" Modern Casting, Oct. p. 528 (1963)
- (11) 岡田, 中江, 祖父江, 横井 "低周波誘導炉における溶解条件と溶湯特性との関連" 鑄物, 45 p. 592 (1973)