



アラカルト

日本の大量生産鋼中の不純物元素精錬 限界濃度の時代変遷（2010年版）

Historical Change in Refining Limit of Impurities in Bulk Steel in Japan, Version 2010

雀部 実
Minoru Sasabe

千葉工業大学
名誉教授

1 これまでのいきさつ

筆者は1983年5月に開催された日本鉄鋼協会第90・91回西山記念技術講座にて、銑鋼一貫メーカーで生産される大量生産鋼の不純物元素精錬限界濃度の変遷を調査し、精錬限界濃度が低下したときの濃度の対数と西暦の関係が直線関係として記述できることを報告した¹⁾。調査は新日本製鐵、日本鋼管（後のNKK）、川崎製鉄、住友金属工業、神戸製鋼所、の高炉5社にお願いした。調査対象とした不純物元素はC、S、P、O、N、Hの6種である。

前記西山記念技術講座では、精錬限界濃度の対数と西暦の関係が調査全期間にわたって1本の直線関係にある、とした。これに対し、SとPとは1本の直線ではなく、折れ点を持つ直線として記述する方が自然である、というご指摘をいただいた。このご指摘により見直した関係を後日、鉄と鋼のコラム記事として取り上げていただいた²⁾。

その後、1992年開催の第143・144回西山記念技術講座企画委員会から前回調査以後10年経過している、この10年間の変化を調査してはどうか、というお勧めをいただき実施させていただいた³⁾。さらに、1999年にふえらむ誌編集委員会から、やがて21世紀に入るのでその前に20世紀最後の10年についての調査をしてはどうか、というお勧めをいただいて、これも実行させていただいた⁴⁾。

本報告は21世紀に入って10年経過したので、その間はどうなっていたのかを、社会鉄鋼工学部会歴史を変える転換技術研究会（永田和宏 座長）の1研究テーマとして実施した結果である。

2 前回調査と今回調査の相違点

前回までの調査にご協力をいただいた企業のうち川崎製鉄とNKKが合併してJFEスチールとなったが、前記2社とJFE

スチールとの連続性については新社内でご検討をいただいております、本稿を執筆するに当たって筆者がさらに検討を加えるということとはしていない。また、前回までの調査データの中に実操業の精錬限界ではなくチャンピオンデータが含まれているという具体的なお申し出があったので、これを前回までのデータから除外した。チャンピオンデータを除外した前回までのデータも含めた調査結果の一覧を不純物元素別に表1から表6に示した。これらの表中では1998年までの5社名をA社からE社として匿名で記入しており、4社になった後はP社からS社までの匿名で記入した。ただし、A社からE社のアルファベット順序とP社からS社までのアルファベット順序

表1 炭素の精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	800			鉄鋼要覧
1957	320		LD転炉	A社
1958	180		LD転炉	C社
1959	200		LD転炉	B社
1961	200		LD転炉	E社
1962	80	電磁鋼板	DHおよびRH	A社
1965	50	電磁鋼板	DH	E社
1968	70	厚板ハイトン、ホイル材、電磁鋼板	DH	C社
1970	150			D社
1973	80	ホーロー用鋼板、	脱炭脱ガス	B社
1974	30	電磁鋼板	VOD	D社
1975	80	深絞り用鋼		B社
1977	20	高級極厚板鋼	RH	C社
1978	50	高級電磁鋼	真空脱ガス法改善	A社
1979	15	極低温溶鋼、耐水素誘起割れ鋼、汎用薄板向け連铸鋼種	VAD、VOD、RH	C社
1979	15			D社
1979	50		複合吹錬	B社
1980	30	薄板連続焼鈍技術、高級電磁鋼	複合吹錬、RH大環流	A社
1981	30		RH改善	E社
1984	20	薄板連続焼鈍技術	多機能2次精錬	A社
1986	10	極低炭素化、超加工性鋼	ガス吹込法改善とCピッキング防止	A社
1986	30		RH還流ガス量の増大	B社
1987	20		RH還流管径の増大	B社
1987	10	連続薄板焼鈍	RH大還流化	C社
1988	15	連続焼鈍・電気メッキ鋼板	RH大還流化	E社
1989	12	超加工用鋼板	RH排気能力増強	B社
1990	8	IF鋼	RH槽内地金除去	B社
1991	10	極低炭素鋼	RH還流管径増大	D社
1991	10			C社
1995	7	IF鋼	多機能バーナー	B社
1998	7			B社
1998	10			C社
1998	10			D社
1999	10			Q社
2008	6	自動車用鋼	2次精錬脱ガス	P社
2008	10			Q社
2008	15	連続焼鈍・電気メッキ鋼板		R社
2008	7	IF鋼		S社

に関連はない。

③ データ処理の方法と処理の結果

データ表に示した西暦と濃度の関係をグラフ化すると、いずれの不純物元素についても図1のような階段状のグラフになる。図1は、精錬限界濃度は年とともに徐々に低下するの

表2 硫黄の精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	250			鉄鋼要覧
1940	350			鉄鋼要覧
1957	120			A社
1958	100			B社
1959	150			E社
1960	200			A社
1965	50	低温用鋼	KR	C社
1966	50	リムト薄板	N ₂ 吹込み脱硫	E社
1968	100	ラインパイプ材	溶銑脱硫	B社
1969	50	ラインパイプ材	気泡ポンプ	B社
1972	20	ラインパイプ材	気泡ポンプ	A社
1973	20	大入熟用鋼	LF	C社
1973	20	ラインパイプ材	溶銑脱硫	KR
1973	30	低温用鋼・ラインパイプ材	フラックスインジェクション	B社
1976	10	耐ラメラティア鋼	Ca処理	E社
1977	10	耐水素誘起割れ鋼	LF操業改善	A社
1978	10	耐サワーガス用鋼	VAD,VOD,RH	C社
1979	5	耐水素誘起割れ鋼 極低温溶鋼	フラックスインジェクション	D社
1979	10	耐水素誘起割れ鋼 連铸用鋼種	フラックス精錬	B社
1982	8	耐水素誘起割れ鋼	フラックスインジェクション	C社
1983	4	耐水素誘起割れ鋼増加	多機能2次精錬	A社
1984	5	海洋構造物鋼	スラグ改善	E社
1984	7	耐水素誘起割れ鋼	取鍋加熱精錬	B社
1985	4		LF	D社
1985	4	耐水素誘起割れ鋼		B社
1991	5			C社
1991	4			E社
1991	5	耐水素誘起割れ鋼	真空下脱硫	B社
1998	5			C社
1998	4			D社
1998	4			Q社
1999	5	圧力容器・ラインパイプ材	2次精錬脱硫	P社
2000	5			R社
2008	4			S社
2008	5	耐水素誘起割れ鋼		
2008	5	耐水素誘起割れ鋼		

表3 リンの精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	100			鉄鋼要覧
1940	650			鉄鋼要覧
1957	200			A社
1959	200			B社
1961	150			E社
1962	100			B社
1965	150	大入熟用鋼・低温用鋼	ダブルスラグ	A社
1970	100	耐ラメラティア鋼	2回出鋼	A社
1970	70			C社
1973	100	80kgハイテン	ダブルスラグ	E社
1975	40			D社
1976	90	耐ラメラティア鋼	ダブルスラグ	B社
1976	30			C社
1977	30	9%Ni鋼	ダブル処理	E社
1979	16	耐水素誘起割れ鋼	AOD-VOD	C社
1979	20			D社
1979	80			B社
1981	30	低合金鋼	LD-LF	E社
1982	50	新制御圧延技術	溶銑脱リン	A社
1983	16			C社
1984	20			B社
1985	15	耐水素誘起割れ鋼	溶銑予備処理	C社
1986	10	9%Ni鋼	VAD・VOD	B社
1988	10		取鍋精錬・転炉スラグカット	B社
1988	15			C社
1988	20			D社
1999	54	9%Ni鋼		Q社
2002	30	低合金鋼	LF省略	R社
2008	30	低合金鋼		R社
2008	15			P社
2008	10	9%Ni鋼		S社
2008	54			Q社

ではなく、しばらくの間同じ値を取り続け、その後急激に下落した後再び一定値を取り続けるということを示している。以後一定値を取り続けているデータをテラス上の点と呼びグ

表4 酸素の精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	50			鉄鋼要覧
1940	100			鉄鋼要覧
1957	45			A社
1959	35			B社
1959	20			E社
1962	35	厚肉高強度鋼	DH・RH	A社
1968	30			C社
1970	25	極厚大単重板	DH	B社
1971	20			C社
1972	15	全鋼種介在物減少化	取鍋Arバブリング・注入流シール	E社
1973	20	極厚高強度鋼	LF	A社
1975	15			D社
1976	22		溶鋼Arバブリング・スラグカット	B社
1977	20		注入流シール	B社
1978	18		塩基性取鍋れんが	B社
1978	10	深絞り用鋼	複合吹錬・RH	D社
1978	10	高炭素鋼線材	VAD	E社
1979	11			C社
1979	9	高炭素鋼	高真空下ガス搅拌	E社
1980	10		ASEA・SKF	B社
1981	10	肌焼鋼の連铸	フラックス精錬	A社
1983	11			C社
1983	10			E社
1986	9	軸受鋼	2次精錬スラグ清浄化	D社
1987	5	転動疲労寿命改善	スラグ成分制御・鑄造技術改善	C社
1988	9	軸受鋼	溶銑脱リン+RH	E社
1990	5	軸受鋼	スラグ組成制御・タンデム脱リン誘導加熱	B社
1990	5	軸受鋼		D社
1991	4			B社
1991	6	軸受鋼	脱リン銑使用	E社
1992	7	軸受鋼	溶銑脱リン	E社
1995	6	軸受鋼	タンデム脱リン加熱	E社
1998	4			B社
1998	5			C社
1998	5			D社
1998	6			E社
1999	9	軸受鋼	LF	Q社
2000	5	軸受鋼	RH改善	R社
2002	5	軸受鋼	RH長時間環流	R社
2006	3	軸受鋼疲労寿命向上	RH環流制御	S社
2008	5			P社
2008	4	軸受鋼	ダブル処理	R社

表5 窒素の精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	10			鉄鋼要覧
1940	80			鉄鋼要覧
1957	45			A社
1957	45			B社
1958	30			C社
1959	45			E社
1961	30	非時効性薄鋼板	LD転炉	E社
1961	40	非時効性薄鋼板	低窒素吹錬	A社
1961	30	非時効性薄鋼板	LD転炉導入	E社
1965	35	薄板用鋼板の連铸化	注入流シール	A社
1966	12	リムト薄板		C社
1968	25			E社
1970	40			B社
1972	20	80kgハイテン	シール鑄造	E社
1975	30		注入流シール	B社
1976	25	深絞り用鋼	リムト出鋼	B社
1977	10	高級極厚板材	RH	C社
1978	15	深絞り用鋼・連続薄板	複合吹錬	D社
1980	20		複合吹錬	B社
1980	30	薄板連続焼鈍技術	複合吹錬・鑄造中シール強化	A社
1981	20		吹錬技術改善	A社
1982	15	薄板連続焼鈍設備	ソーダ灰脱硫	B社
1983	10			C社
1989	10	極低炭素鋼	Niバックアップ防止	D社
1991	20			E社
1991	10	IF鋼	脱窒用フラックス	B社
1991	10			C社
1997	15	高級電磁鋼板	RH操業改善	E社
1998	10			B社
1998	10			C社
1998	10			D社
1998	9			E社
1999	20	深絞り用鋼	シール強化	Q社
2008	10	IF鋼		S社
2008	15	高級電磁鋼板		R社
2008	10			P社

表 6 水素の精錬限界濃度の時代による変化、それを求めたニーズ、対応した技術

西暦	限界濃度(ppm)	ニーズ	対応した技術	回答社
1940	4.0			鉄鋼要覧
1940	.02			鉄鋼要覧
1957	3.5			A社
1958	4.0			C社
1959	3.0			E社
1960	1.2			D社
1960	3.2			B社
1961	2.0		LD転炉	E社
1962	2.0	厚肉高強度鋼	RH, DH	A社
1966	2.0	厚板ハイテン・ボイラー材・電磁鋼板	DH	C社
1965	1.0	厚板	DH	E社
1970	2.5	極厚単重鋼板	DH	B社
1975	0.7	大型鍛造用鋼	取鍋精錬	D社
1975	1.5	耐ラメラティア鋼	脱ガス処理時間延長	A社
1977	1.2	高級極厚板	RH	C社
1979	2.0		RH脱ガス	B社
1980	1.0	耐水素素起割れ鋼	ASEA-SKF	B社
1983	1.2			C社
1984	1.0	海洋構造物用鋼	多機能2次精錬	A社
1987	0.5	極厚鋼板連铸化	RH大環流化	C社
1989	0.8		RH排気力増大	B社
1998	0.8			B社
1998	0.5			C社
1998	0.7			D社
1998	1.0	厚板	RH	E社
1999	1.5	厚板・ラインパイプ材	2次精錬脱ガス	Q社
2004	0.5	高級厚鋼板	RH排気能力向上	S社
2008	0.5			S社
2008	1.0	厚板		R社
2008	0.5			P社

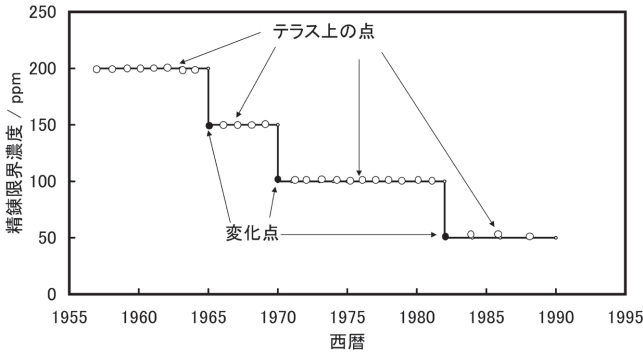


図 1 精錬限界濃度の時代変遷説明図

ラフ上では白丸として示し、テラスが途切れ精錬限界濃度が急激に下がった点を変化点と呼び黒丸で示した。

西暦と精錬限界濃度の対数の関係をグラフ化したものを、不純物元素別に図2から図7に示す。図2から図7でも変化点を黒丸で、テラス上の点を白丸で示した。データが黒丸に相当するのか白丸に相当するのかの判断は次のようにした。第1回調査においては1960年以前のデータはニーズと対応技術が明確ではないが、精錬限界濃度が大きく変わった時点の数値を回答していただいているので黒丸にした。ただし、1940年は調査データではなく鉄鋼要覧⁵⁾に存在する数値を拾い上げたものなので、変化点であるかどうかは判定できないので白丸にした。1960年以後の白丸は調査時点での精錬限界値であって、変化点ではないことを意味している。図2から図7は1990年以後に変化点はほとんど存在せず、敢えて言うならば、脱酸・脱ガス反応で精錬される元素(C, O, N, H)では多少の変化点が存在するが、スラグーメタル間反応で精錬され

る元素(S, P)では変化点が見られない、といえる。

それぞれの図の黒丸だけに着目して、精錬限界濃度の対数と西暦の関係を直線回帰した。S(図3)とP(図4)は全期間を1本の直線で描くことができず、折れ点を持つ直線となったが、その他の元素は1本の直線として描くことができた。この黒丸の集まりを直線回帰した結果を表7に示した。表7中の誤差範囲は実績値と回帰値の差の絶対値の和をデータ数で除した値である。SとPに関しては、折れ点で交わる2本の直線の後半部分だけを回帰したものであり、その他の元素は全期間に涉って回帰したものである。これらの回帰式は1999年の調査結果とほとんど同じものとなった。将来何らかのニーズにより精錬限界濃度を減少させなければならないことが生じた場合、要求される精錬限界濃度は表7の回帰式から推定できる。ただし、ある年の実際の精錬限界濃度が推定値より高い値となっていたとしても、それは技術の遅れを示しているのではなく、その年はまだテラスの上にあるという意味を持つ。

4 画期的な技術の出現

着目している事象と年代との関係を数学関数として記述できるときに歴史的慣性があるということにすると、本稿の不純物精錬限界濃度変化には歴史的慣性がある、といえる。歴史的慣性という言葉は使用していないが、本稿と類似の現象を見出しているものに、1965年に提唱されたムーアの法則⁶⁾がある。これは「半導体の指数関数的進歩の法則」と呼ばれているもので、マイクロプロセッサの集積度の進歩を予測するものとして提唱されたものである。ムーアとはインテル社の設立メンバーの一人で、同社の第2代CEOを勤めたGordon E Mooreである。インテル社のホームページが紹介しているムーアの法則の説明図面⁷⁾から数値を読み取って作図し直したものを図8に示した。図8は1つのマイクロプロセッサ中に組み込まれているトランジスタの数の年代による変化を示している。この図の縦軸はマイクロプロセッサ中のトランジスタの数の対数、横軸は西暦であって、両者の関係が直線関係にあることを示している。直線は1本の直線ではなく、折れ点で接続する2本の直線の組み合わせになっている。描かれた直線が折れ点を持つ直線となる場合、折れ点において画期的な技術が出現したと見做すとしている。

本報ではSとP(図3と図4)が折れ点で接続する2本の直線となった。Sに現れる折れ点は1965年であり、この頃に画期的な技術が出現したとすると、その画期的な技術とは炉外精錬法であろう。それまでは高炉内で行っていた脱硫を高炉外で行なうようになり、この高炉外精錬法が脱硫限界濃度の低下に大きく寄与した。この頃、溶銑のガスバブリング法

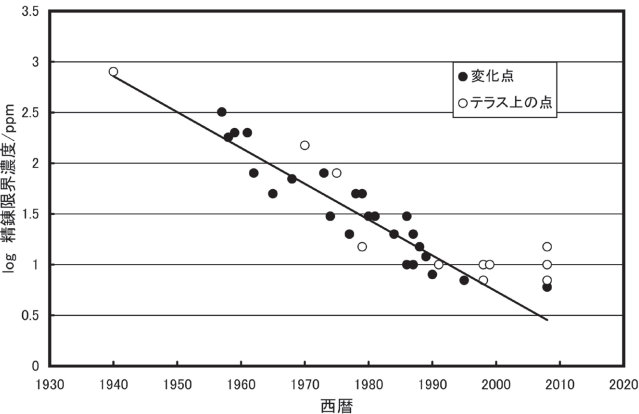


図2 炭素の精錬限界濃度の変遷

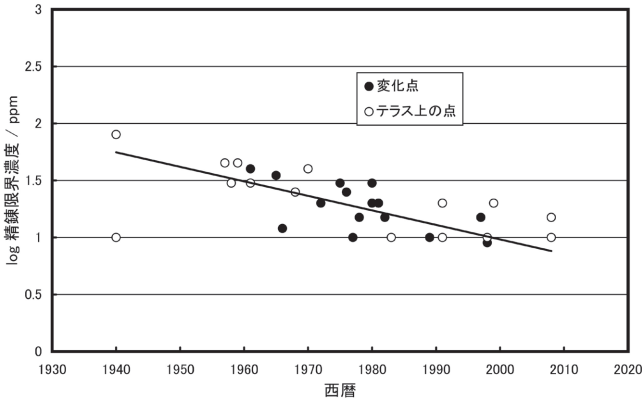


図6 窒素の精錬限界濃度の変遷

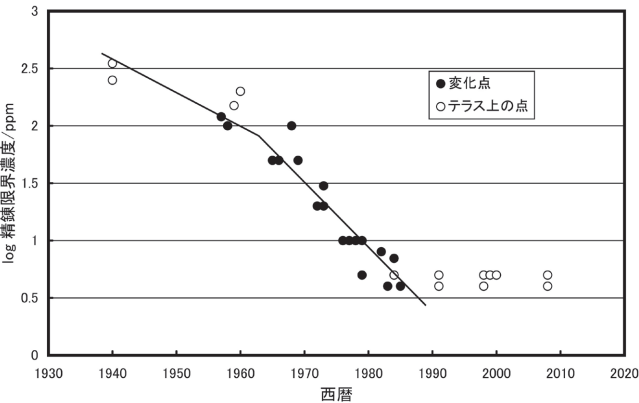


図3 硫黄の精錬限界濃度の変遷

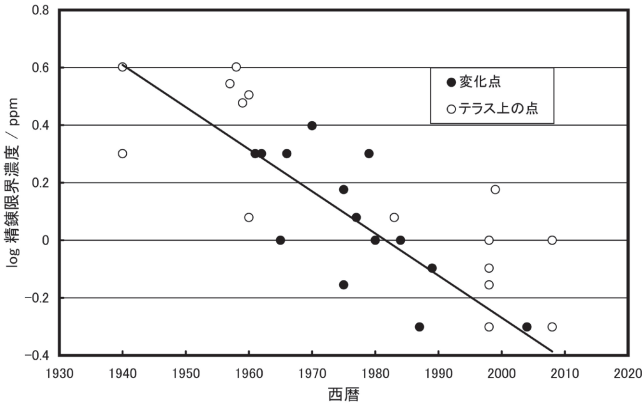


図7 水素の精錬限界濃度の変遷

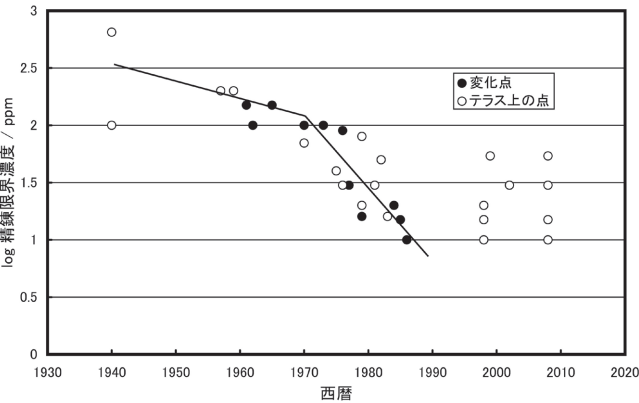


図4 リンの精錬限界濃度の変遷

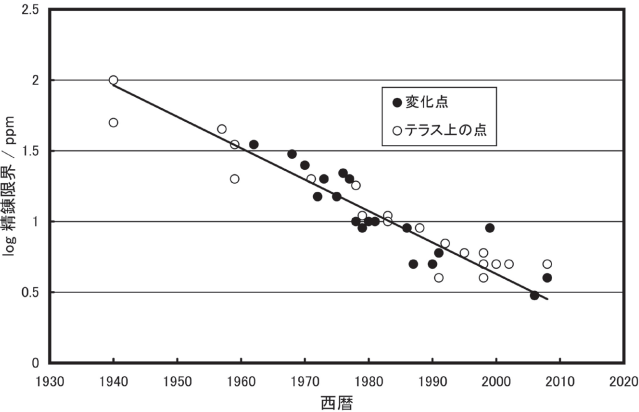


図5 酸素の精錬限界濃度の変遷

表7 精錬限界濃度の変化と西暦の関係

不純物元素	回帰式	適用範囲
C	$\log C = -0.0362x + 73.174 \pm 0.253$	全領域
S	$\log S = -0.0551x + 110.01 \pm 0.1776$	1965年以降
P	$\log P = -0.0636x + 127.32 \pm 0.1602$	1970年以降
O	$\log O = -0.0222x + 45.089 \pm 0.1257$	全領域
N	$\log N = -0.0127x + 26.431 \pm 0.118$	全領域
H	$\log H = -0.0146x + 29.002 \pm 0.122$	全領域

xは西暦
不純物元素濃度の単位は ppm

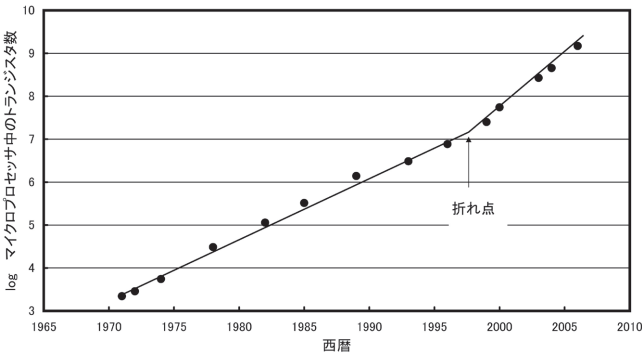


図8 マイクロプロセッサ発展でのムーアの法則⁷⁾

や機械攪拌法が出現している。Pに出現する折れ点は1970年であり、この頃ダブルスラグという転炉精錬の途中でスラグを入れ替えるという方法が普及し始めている。それに続いて取鍋精錬法が出現している。転炉外精錬が脱リン効果を飛躍的に高めていると見なせる。脱硫および脱リンはスラグーメタル間反応を利用するものであり、脱炭、脱窒、脱水素は生成物の気体除去、脱酸はアルミニウムやフェロシリコンのような金属添加物により行なわれている。すなわち精錬反応はスラグーメタル間反応ではない。スラグーメタル間反応を利用する精錬は折れ点で連続する2本の直線で記述できたが、精錬反応がスラグーメタル間反応ではない場合には1本直線で記述できた。この記述される線に折れ点があるかないかという観点から画期的な技術の出現を判断すると、スラグーメタル間反応を利用する精錬には画期的な技術革新があったとすることができる。

マイクロプロセッサ中のトランジスタ数の時代変化や不純物元素の精錬限界濃度の時代変化以外に次のような例がムーアの法則にのっている、すなわち歴史的慣性を持っている。図9に蛍光X線分析の検出下限値の時代変化を示す⁹⁾。この図は縦軸に検出限界濃度の対数、横軸に西暦をとっている。ここでも両者の関係は直線関係にあり、ムーアの法則に従っている、あるいは歴史的慣性を持っているといえる。図10に永久磁石の性能の時代変化を示した。この図は金属誌に掲載された図面から筆者が数値を読み取ってグラフ化したものである。この図の縦軸は永久磁石の性能を示す最大エネルギー積の対数、横軸は西暦をとっている。この図はNd-Fe-B系磁石の出現までは直線関係にあるが、現在はNd-Fe-B系磁石の発展が停滞していることが示されている。この例では歴史的慣性を持っているとは断言できないが、次に出てくる新しい磁石の性能が、停滞以前の直線の延長線上に出現するかどうかは興味のあるところである。図11は超伝導材料の臨界温

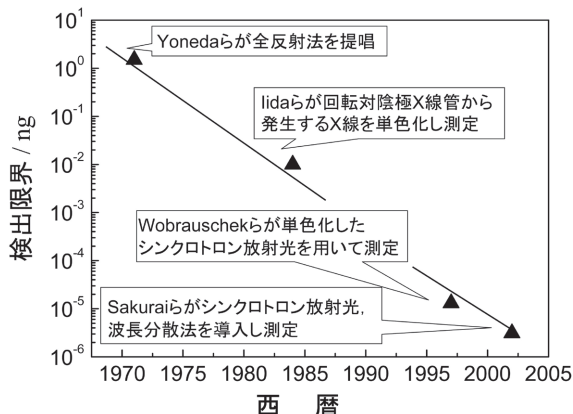


図9 蛍光X線分析の検出下限値の進歩⁹⁾

度の時代変化を示したものである。この図は最近のふえらむ誌¹¹⁾に掲載されたグラフから数値を筆者が読み取って片対数グラフに書き換えたものである。この図で金属系材料に着目すると1930年以降の進歩はムーアの法則に乗っているといえる。他の材料にも着目すると、新材料が発見された直後は急激な進歩があることが示されている。しかしその後ムーアの法則に乗った進展になるかどうかは不明である。酸化物系材料、Fe合金系材料とも金属系材料のムーアの法則延長線より高い値をとっているため、この2つの系統の材料は画期的材料であるということはいえる。

5 まとめ

筆者は1980年代前半頃から大量生産鋼中の不純物の精錬限界濃度をほぼ10年おきに調査してきた。本稿は2009年に調査をした結果である。この結果とこれまでの調査結果とを合わせて本稿にまとめた。従来の調査結果は、精錬限界濃度が改善されたときには、改善で得られた濃度の対数と改善のあった年との関係が直線関係にあることを見出している。今回の調査結果で、前回調査以後改善された精錬限界濃度は

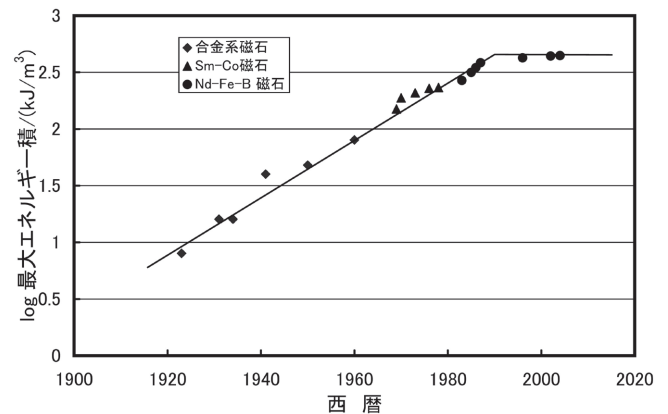


図10 永久磁石の発展¹⁰⁾

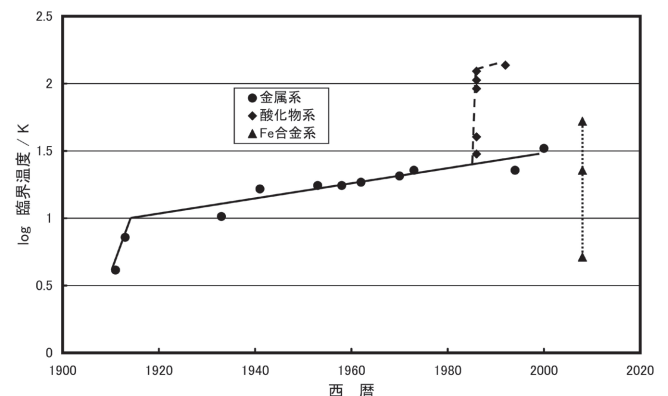


図11 超伝導材料の発展¹¹⁾

従来得られている直線の延長上にあることが分かった。しかし、改善の出現回数頻度は1990年以前に比べ多くはなかった。

今回の調査だけでなく、これまでの調査においても絶大なご協力をいただいた日本鉄鋼協会生産技術部門製鋼部会の部会長をはじめとする委員各位に厚くお礼を申し上げる。

また、SとPの整理は全期間に渡って1本の直線として表すよりも、折れ線を持つ直線として表す方がよいというコメントを下さった、東京大学名誉教授館充先生、蛍光X線分析に関するグラフをご提供くださった京都大学大学院工学研究科河合潤教授に厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 雀部実：第90・91回西山記念技術講座テキスト，日本鉄鋼協会編，(1983)，21.
- 2) 雀部実：鉄と鋼，69 (1983)，1831.
- 3) 雀部実：第143・144回西山記念技術講座テキスト，日本鉄鋼協会編，(1992)，1.
- 4) 雀部実：ふえらむ，4 (1999)，558.
- 5) 鉄鋼要覧 (1944年8月)，日本鉄鋼協会編，771.
- 6) 朝日新聞記事，2009年6月20日朝刊 be 1面
- 7) インテル社ホームページ：
<http://www.intel.co.jp/jp/technology/mooreslaw/index.htm>，2010年4月6日アクセス
- 8) 日本鉄鋼協会鉄鋼科学技術史委員会：わが国における酸素製鋼法の歴史，日本鉄鋼協会，(1982)
- 9) S.Kunimura and J.Kawai：Adv.X-Ray Chem. Anal., Japan, 41 (2010)，29-44.
- 10) 金子裕治：金属，74 (2004) 4, 11.
- 11) ふえらむ，15 (2010) 3, 111.

(2010年5月13日受付)