



入門講座

専門用語—鉄鋼プロセス編-3

エネルギー問題・環境問題を考えるヒント

エクセルギー

秋山 友宏 Tomohiro Akiyama 国立宮城工業高等専門学校 機械工学科 助教授
八木順一郎 Jun-ichiro Yagi 東北大学 素材工学研究所 教授

Hint for Energy- and Environmental Problems
Exergy

1 はじめに

最近、相次いで「エクセルギー」を冠に据える研究プロジェクトが実施され、有意義な研究成果^{*1}が公表されつつある。このようにエクセルギー解析が話題になり、解析の一躍を担うようになってきた原因はどこにあるのだろうか。これまでのエネルギー評価では十分でないのか。エクセルギーとは一体どういう概念なのか。また環境問題に対してもエクセルギー的思想は有望であると言う。本稿では初学者を対象にできるだけ基礎的にこれらの説明を試みたい。

2 エクセルギーを支える本質的な2大法則

エクセルギーを説明する前に歴史的経緯を踏まえ基礎的な2つの法則を再確認する。

2.1 物質は保存される

— Everything is built up of tiny invisible block, each of which is eternal and immutable. Democritus —

古来哲学者は地球は「土」と「空気」と「火」と「水」の4大元素から成り立っていると夢想していた。しかしそれでは不合理が生じ紀元前500年頃にギリシャに現れたデモクリトスは、「すべてのものはそれ以上分割できない、究極的な、目に見えないちっぽけなブロックから構成されている」と考えた。原子説である。そしてそのブロックをアトムと名づける。A-tomはun-cuttableに由来する¹⁾。従って、原子レベルでの物質保存の考えは約2500年前に遡る。

残念ながらこの概念は当時認知されず19世紀初頭のドルトンの出現まで待つことになるが²⁾。

この原子説は、地球はその誕生以来、C, H, O, Nなどの原子の組み替え作業を永遠に行ってきて、そしてこれからも続くことを教える(図1参照)。もちろん、核融合のように原子が変化する例外は除くが、その量は無視できるだろう。したがって、大気圏を境界域とする限られた範囲内で物質は原子レベルで完全に保存されている。廃棄物ゼロ(ゼロエミッション)である。ただ原子のパートナーが変化しているだけである。もちろん、流星やロケットなどその境界を出入する物質はまれに存在するが、地球の質量に対して無限

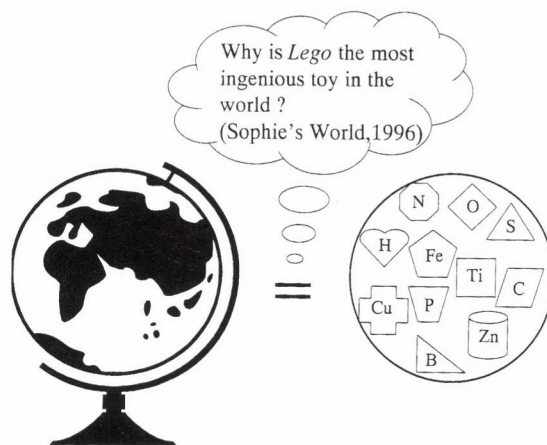


図1 地球上の原子は保存されている。ベストセラー「ソフィーの世界」では「なぜ、レゴ(ブロックのおもちゃ)は世界一超天才的なおもちゃなのか?」と少女に問い掛けた。—(本文抜粋)レゴは分けられない。頑丈で穴なんかあかない。凹凸があってあらゆる形を作れる。このことから自然は組み合わさったり、またばらばらになったりするちっぽけな構成ブロックから成り立っている¹⁾ことを示した。

*1 例えば、文部省科学研究費重点領域研究「エクセルギー再生産の学理」(吉田邦夫(東大)領域代表、平成6—9年度)、日本鉄鋼協会熱経済技術部会「製鉄プロセスにおけるエクセルギー評価とエネルギー有効利用の可能性研究」(福嶋信一郎(NKK)部会長、高橋 務(住金)主査、平成8、9年)、日本機械学会第76期全国大会ワークショップ「エクセルギー解析の可能性」(平成10年度予定)など。

小だろう。そのため恐竜の体内にあった炭素原子が、今自分の体内に存在していても何ら不思議ではない¹⁾。

われわれ人間にとって今や深刻な物質と位置づけられる炭酸ガスやダイオキシシンやフロンも、含有する炭素や塩素やフッ素の総量は地球上において不変であり地球にとっては何ら問題ではない。「雑草」という名の草はないという。同様に「廃棄物」という名の物質も存在しない。「地球にやさしい」とか「地球環境問題」という言葉の裏に人類の思い上がりが見え隠れする。

一では、この46億年の地球の歴史で原子の組み替えは自由気ままに、何の法則にも従わず行われてきたのだろうか。それとも神の意志でも働いたのだろうか。

地球上で生活するものにとって最大の境界線は大気圏となるが、解析においては関心がある特定領域を指定するのが通例である。例えば都市、製鉄所、あるいはもっと小さなプロセス(物理的变化、化学的变化のこと)を対象にしてもよい。プロセスの集合体をシステムと呼ぶ。重要なことは境界線を横切り出入りする物質の量は原子のレベルで完全に収支することである。例えば、炭素(C)と酸化鉄(Fe_2O_3)を混ぜて加熱すると金属鉄(Fe)と燃焼排ガス(CO と CO_2)が発生するプロセスがある。このプロセスに関与する原子はC、Fe、Oの3つであり、それぞれの原子について、システムに出たものから入ったものを差し引くならばゼロとならなければならない。

2.2 エネルギーは保存される(熱力学第1法則)

物質が地表空間内で保存され閉じているのに対して、エネルギーは太陽から境界線を横切り供給されるため開いた系である。水力、火力、原子力はいずれも形を変えた太陽エネルギーと見なすことができる。このエネルギーが保存されることが見出されたのは150年ほど前で、意外と最近のことである(図2参照)。ジュールは1847年に落下する重りにより羽根車を回し、水をかき回す機械的実験を行って熱の仕事当量Jの値を測定した²⁾。この実験結果は位置エネルギー(J)と熱エネルギー(cal)の比率がいつも一定(4.186)であり、このことからエネルギーは量的に保存されることをあきらかにした。現在ではすべての種類のエネルギーに拡張されこの法則の成立が認知されるに至っている。これはエネルギー保存則あるいは熱力学第一法則と呼ばれる。このようにエネルギーは変換こそすれ、不生不滅でその量は一定である。それにもかかわらず、「省エネ推進」とか「エネルギーを大切にしよう」という。

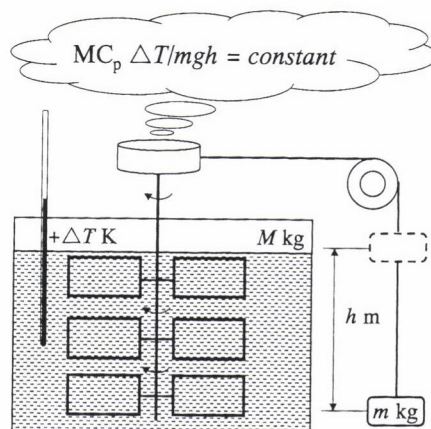


図2 ジュールの実験装置の概略図。位置エネルギーと熱エネルギーは等価であることをはじめて例証した。エネルギー保存則の確立に結びつく。

一では一体この不生不滅のエネルギーをどうやって大切にしたらよいのだろうか。

2節のまとめ

物質およびエネルギーは保存される。

3 不可逆性に関すること

3.1 エクセルギーとは

数ある法則のうち、経験に基づく法則はめずらしい。熱力学第2法則もそのひとつだろう。そのため表現方法がいくつもあって初学者には全く理解しづらいことこの上もない。一説によると一流大学の熱力学の講義でいかに懇切丁寧に教えたところで、80%以上の学生がこの法則を前にして落ちこぼれるそうである³⁾。

結論から先に言うと、エクセルギー(Exergy)による熱力学第2法則の表現は極めて簡単、明確である。それは

「システム内でエクセルギーは必ず減少する。」
(エクセルギー減少則)

ことである。システム内でエクセルギーの値はまれに変化しないことはあっても、絶対に増加することはない。エクセルギーとはエネルギーのうち使用可能なものを意味する。「使えば減る」エネルギーこそ、まさにエクセルギーを指す。だから、われわれはエネルギーではなく、無意識のうちにエクセルギーを大切に使うように心がけていることに気づく。

その命名者は東ドイツの熱工学者ラントで、1953年のことであった。この名前はVDI(ドイツ技術者協会)で1956年正式な呼び名として採用され、東欧圏に定着していった⁴⁾。語源はギリシャ語で仕事をあらわすエルゴンに外への意味

を持つ接頭語exをつけたものである。直訳は「取り出せる仕事」とでもすべきかもしれない。逆に使用不可能なものはアネルギー (Anergy) と呼ばれる。エネルギーはGibbsの自由エネルギー ($\Delta H - T\Delta S$) と熱 ($T\Delta S$) から構成される。前者はすべて仕事に変換することができるが、後者はカルノー効率 ($1 - T_0/T$) に制約される。そのため、エクセルギー*2は $\Delta H - T_0\Delta S$ 、アネルギーは $T_0\Delta S$ で表現される。エクセルギー減少則はエネルギー変換において使用可能なものから使用不可能なものへ変化することを示している。

ではどういう時にエクセルギーが減少するのか身近な例を用いて考えてみたい。熱力学第二法則はエントロピーを導入し定量的評価がおこなわれるようになるまでに長時間を要したが、面白いことにこれら議論に科学者が苦労している間に日常生活においては既にこの法則は確立されていた。例えば、「覆水盆に返らず」、「It is no use crying over spilt milk」、「長いものには巻かれよ」等である。もし、これらの格言をよく知っていて、しかも日常生活でなるほどと思うことが多ければ、それだけで熱力学の第二法則を知っていることになる⁵⁾(図3参照)。

お湯と水を混ぜてぬるま湯ができる場合、エネルギーを表すエンタルピー量は比熱、温度、質量の積で計算でき保存されるが、エクセルギーは保存されない。ぬるま湯 2 kgの方がお湯 1 kgよりも小さな値となる。これはぬるま湯は自然にはお湯に戻ることができないこと、すなわちこの現象が不可逆であることに由来している。このように不可

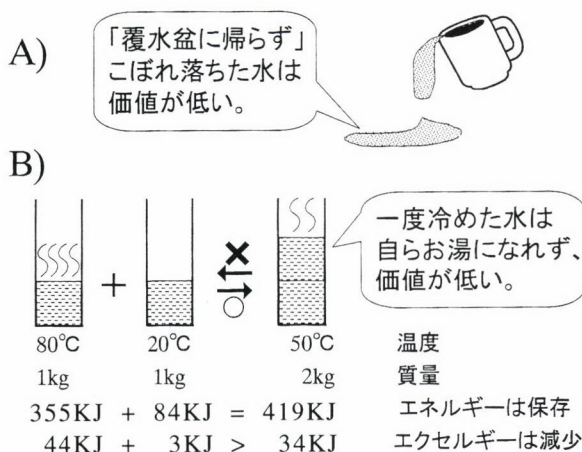


図3 不可逆性を示す2例。A)は諺「覆水盆に返らず」は不可逆性による価値の低下を示唆している。B)は混合によるエクセルギーの減少例。混合前後でエネルギーは保存されるが、一度冷めたものは価値が下がったことは自明である。エクセルギーではその違いを明確に評価できる。

逆性の度合いによってエクセルギーの減少割合は異なってくる。

3.2 生産活動とは

生産活動におけるエクセルギーの動きを考えてみる。製鉄においては「原料」は酸化鉄 (Fe_2O_3)、「製品」は金属鉄 (Fe) である(図4参照)。ところが、自然界に放置しておいて $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$ と自ら変化することはいない。この理由は一般的に原料は低エクセルギー物質、製品が高エクセルギー物質であるために、エクセルギー減少則に反するためである。そのため製鉄においては高エクセルギー物質である石炭という「資源」を投入して、流入エクセルギーが流出エクセルギーよりも大きな値として内部で傾斜をつける必要がある。これがエクセルギー理論から見た一般的な「生産活動」である。それに伴い必ず低エクセルギー物質である「廃物・廃熱」が発生する。廃熱の多くは最終的には大気放散や冷却水という形態を取る。

ここでエクセルギーは2つの形態で消費されていることに気づくことは重要である。「廃物・廃熱」の形式で持ち出されるエクセルギー(第1種損失、図中B部)とこの現象を生起させるのに必要なシステム内部でのエクセルギー損失(第2種損失、図中A部)は本質的に異なっている。前者は有効に回収し再利用することにより減少は可能であるが、後者はシステムの本質に関わる、いわばシステムの駆動力といえる。そのため現行のシステム解析においては必要最小限の後者の値をあらかじめ認識しておくことが肝要である。ひとたび理論最小値が求められたならば最終目的が明確になり、現行システムのエクセルギー消費量と比較する

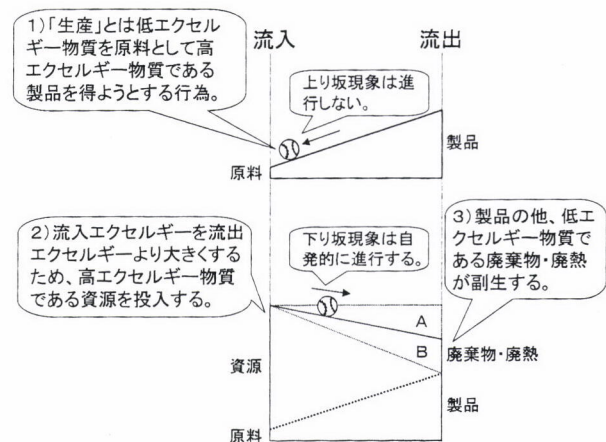


図4 生産活動におけるエクセルギー変化図。ボールは下り坂しか転がらないように、エクセルギーも内部で減少し下りに傾斜していなければならない。

*2 $(\Delta H - T\Delta S) + T\Delta S(1 - \frac{T_0}{T})$ ここでHはエンタルピー(J)、Sはエントロピー(J/K)、Tは温度(K)である。T₀は環境温度25°C (298.15K)を表す。

ことにより到達度が明らかとなる。また成熟産業か否かを判断する一つの切り口にもなり得るだろう。

3節のまとめ

- 1) エクセルギーとは地球環境を基準にした熱および物質のうち使用可能なエネルギーを表す。
- 2) 生産活動とはシステム内に意図的にエクセルギー減少の傾斜をつけることである。

4 システム考察法

4.1 システムにおける物質、エネルギー、エクセルギーの関係

熱力学的にはプロセスとは物理的变化、化学的变化である。加熱、冷却、圧縮、膨張、反応などの単一あるいは複合した形態を指す。場合によっては見えないこともある。炉壁からの放熱による周囲温度の上昇等がこれに該当する。見えない場合も解析においてはプロセスとして認識する感覚を養う必要がある。

図5に3つのプロセスから構成されるシステムを示す。プロセスに流入する物質(図中黒矢印)に特に拘束条件はない。ただし、物質を限定するために、その速度、組成、温度、圧力を知っておく必要がある。その結果、物質収支より流入する原子は等しくなり($\Delta M=0$)、個々のプロセスで完全に閉じていなければならない。エネルギーに関しては体積膨張が可能な系ではエンタルピーで記述できる。流出から流入を減じたエンタルピー差(ΔH)は熱や仕事の放出や取り込みを生じさせる。プロセス間を移動するこのエネルギーは仲介エネルギーと呼ばれる(図中白矢印)。反応プロセスの場合この値が負は発熱、正は吸熱反応を意味する。

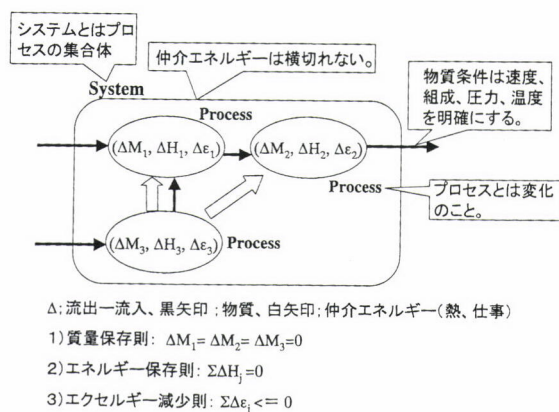


図5 システムにおける物質、エネルギーおよびエクセルギーの関係。3つのプロセスからシステムが構成される場合。

一方システムはいくつかのプロセスから構成される。システム境界は仲介エネルギーが横切らないように設定する必要がある。その結果、システム内において熱力学第1法則より各プロセスのエンタルピー和はゼロ、第2法則よりエクセルギー和はゼロまたは負となる。個々のプロセスにおいてはエクセルギー差($\Delta \epsilon$)は正であっても、負であってもかまわないが、その和は決して正になることはない。一見するとエクセルギーが増加しているようにみえる都市形成、人間成長、自動車製造などの現象もシステムとしてその原料や食料製造等々のプロセスもすべて考慮するならば、必ずエクセルギー和は大きく減少していることになる。

4.2 熱力学コンパス³⁾

物質、エンタルピーおよびエクセルギーの3者の関係を考察する。前2者は保存則のもとで自由に変換できるが、それはあくまでもエクセルギー減少則のもとで行われていたことに気づく。部分(プロセス)的には酸化鉄が還元されて鉄ができたり、燃焼によって高温が得られエクセルギーが増加したとしても、全体(システム)的には不可逆性に逆らうことができずエクセルギーは必ず減少する。

そのようなシステムを考察するとき、物質は各プロセスで収支しているので、 ΔH と $\Delta \epsilon$ についてのみ議論すればよい。2変数の関係を明確にするために、図6に示すように x 軸、 y 軸にそれぞれの値をとると都合がよい。この方法はシステム設計における羅針盤となり得ることから、熱力学コンパスと呼ばれている。グラフ上にはプロセスの数だけベクトルが表示され、それらベクトルの和は y 軸上に必ず鉛直下向きに現れる。これがエクセルギー消費である。ベクトルの位置によりプロセスの分類ができる。 $\Delta H > 0$ 領域(第1, 4象限)はエネルギーを受け取るプロセス、 $\Delta H < 0$ 領域(第2, 3象限)はエネルギーを与えるプロセスとなる。一方、 $\Delta \epsilon > 0$ 領域(第1, 2象限)は自発的には進行しない他力プロセス、 $\Delta \epsilon < 0$ 領域(第3, 4象限)は自発的

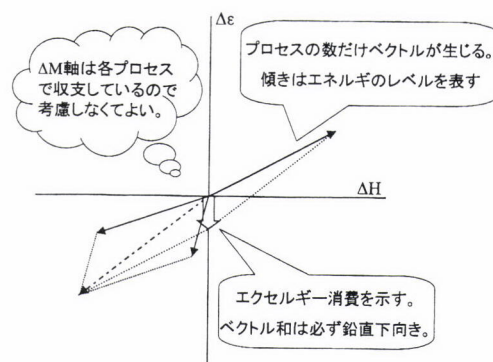


図6 熱力学コンパスの原理図。3つのプロセスの場合。

に進行しうる自力プロセスである。従っていくつかのプロセスを組み合わせ、エクセルギー消費をもっとも小さくなるようなシステムの設計を机上でどんどん自由に行い考察できる。これがこの方法の利点であり醍醐味となっている。ちなみに、ベクトルの傾き^{*3}はエネルギーのレベルを表す。例えば熱に関して言えば傾き 0°が環境温度、45°で温度 $\rightarrow\infty$ に対応する。傾き45°はエントロピーゼロを表す。混合や分離操作、各化学反応は独自の傾きを持ち、第1, 3 象限に現れる。

4 節のまとめ

エクセルギー解析では部分(プロセス)を見るのではなく、全体(システム)を見よ。

5 省エネルギーとは

環境と異なる状態にある時、環境状態に戻ろうとする現象はすべて不可逆現象でありその時仕事をする事ができる。地球上でその温度、圧力および組成が異なっているため環境状態を一言で定義するのは難しいが、工学的に議論する場合は25℃、1気圧、大気組成(水蒸気飽和)とするのが妥当であろう。厳密にはエクセルギーは化学と熱ばかりでなく、圧力および混合の4つの形態で表現することができる(図7参照)。地球上では物質は最終酸化物になるまで化学エクセルギーを有している。熱及び圧力が常温常圧の状態に乗ることにより仕事ができるのでエクセルギーを有している。極低温や高真空状態も高いエクセルギーを持つ。物質は自然界では混合する一方なので、純物質は高いエクセルギーを持っている。

システム設計においてはこの流れを十分に把握して、段

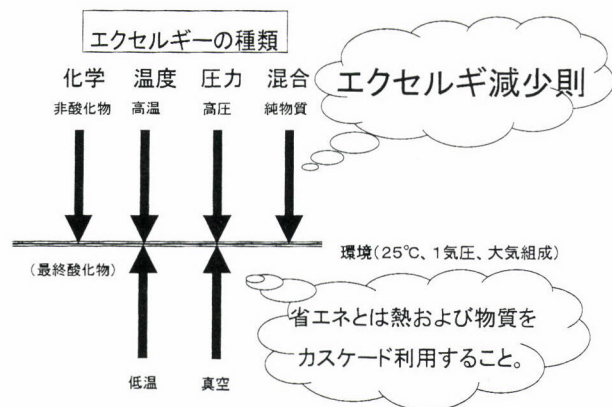


図7 熱および物質の流れはすべて環境へと向かう。

階的に熱および物質を利用することが重要である。いわゆるカスケード利用である。カスケード実現のためにはエネルギー変換、貯蔵、輸送技術が鍵を握ることは異論がない。そこではできるだけ投入エネルギーを減らして生活する知恵を身につけ、現在の炭素中心の生活から徐々に太陽エネルギー社会(そこでは水素が主役となる)到来の準備を進める必要がある。エネルギー変換においてなるべくレベルの近いエネルギー同士、すなわち熱力学コンパス上でいうならば傾きの近いもの同士を組み合わせ、エクセルギー損失が小さくなるようなシステムを設計すべきである。従来の熱効率だけにこだわり、エネルギーレベルを全く考慮しないシステム設計の方法は間違っている。温和なエネルギー変換を志向することこそがカスケード利用のコツと言える。

5 節のまとめ

- 1) 「省エネルギー」とは節約ではなく、熱および物質をカスケード利用すること。
- 2) カスケード利用のためにはレベル差が小さいエネルギーの組み合わせを目指す。

6 おわりに

本稿では学生および若手技術者を対象に基礎的なエクセルギー概念の説明に終始しました。そのため、一切の数式を使用しておりません。文献として優れた出版物^{3,4,6)}が存在することから、関心を持たれた一人でも多くの方が上記図書により「エクセルギー党」に入党していただければ望外の喜びです。また、内容の一部は日本鉄鋼協会熱経済技術部会「製鉄プロセスにおけるエクセルギー評価とエネルギー有効利用の可能性研究」、文部省科学研究費重点領域研究「エクセルギー再生産の学理」(06246103)、「ゼロエミッション」(09247202)のメンバーとの議論の中で生まれました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Jostein Garardor : Sophie's world, a novel about the History of Philosophy, phoenix, London, (1996), 36.
- 2) 岩波理化学辞典第4版, 岩波書店, (1987), 402.
- 3) 石田愈: 熱力学—基本の理解と応用, 培風館, (1995)
- 4) 押田勇雄: エクセルギー講義, 太陽エネルギー研究所 (1986)
- 5) ジェミリー・リフキン, (竹内均訳): エントロピーの

*3 正確には $1 - \frac{T_0}{T - T_0} \ln \frac{T}{T_0}$ で計算される。

法則, 祥伝社 (1982), 29.

6) 信澤寅男: エクセルギー入門, オーム社 (1980)

また、鉄鋼、化学、蓄熱など具体的なシステム解析例として以下のものが挙げられます。

- ・秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, 73 (1987), 2108.
- ・秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 74 (1988), 2270.
- ・秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 77 (1991), 1259.
- ・秋山友宏, 芦沢芳夫, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 日本機械学会論文集B, 57 (1991), 2768.

・佐藤弘孝, 村松淳司, 秋山友宏, 八木順一郎: 石油学会誌, 40 (1997), 427.

・町田 智, 秋山友宏, 八木順一郎: 化学工学論文集, 24/3 (1998), 462.

・T. Akiyama, R. Takahashi and J. Yagi: ISIJ International, 29 (1989), 447.

・T. Akiyama, H. Sato, A. Muramatsu and J. Yagi: ISIJ International, 33 (1993), 1136.

・T. Akiyama and J. Yagi: ISIJ International, 38 (1998) 896.

(1998年4月14日受付)