

製鋼スラグ活用CO₂固定化に向けての ロジスティックスの検討

殿村 重彰*・田淵 敏*²

Logistic Study on CO₂ Sequestration Using Steelmaking Slags

Shigeaki TONOMURA and Satoshi TABUCHI

Synopsis : The kinetic study on the CO₂ sequestration using the steelmaking slags are executed. Optimum feeding rate of slag must be determined by taking into account the plankton multiplication and the mass balance. Based on this kinetics, feasibility study of CO₂ sequestration by steelmaking slag, especially from logistic view point, is carried out, and the cost of this process is compared and discussed with conventional chemical absorption method.

Key words: CO₂ sequestration; plankton; simulation; photosynthesis; Redfield's ratio.

1. 緒言

地球温暖化に対する革新的・抜本的対策としての製鋼スラグを栄養源とするプランクトン増殖による炭酸ガス固定化技術の研究開発において、要素技術の見極めだけでなく、実施を想定した実用化課題に対しても検討を行っておく必要がある。本検討は、簡易モデルにもとづいて増殖挙動を速度論的にシミュレートする事を試み、その結果にもとづき、実用化にあたっての経済指標について、スラグ利用によるCO₂固定化の課題抽出への一助にする事を目的としている。経済指標については、ガス吸着法による炭酸ガス固定化方法との比較検討という視点で実施した¹⁻⁴⁾。

2. 検討方法

2.1 基本的考え方

栄養供給速度とプランクトン増殖の関係に関する詳細な挙動の研究は、現在、精力的に行われているが、その詳細はまだ明確にはなっていない。よって本報告では一次反応を仮定し、栄養供給条件のプランクトン増殖に及ぼす影響を検討した。それにもとづき現有的実機化手段による実用化の可能性の検討を行った。モデルはスラグ中有用元素は全量溶出する事を前提とし、単純化のためスラグの溶出反応が律速過程と仮定して計算を実施した。本仮定は後述するように、実用時においては浮遊体や微粉粒子となるため、ほぼ妥当と考える。一方、プランクトンに固定された炭酸ガスについては、100%固定される場合と、後に再分

解されその結果、固定率が10%となる2つのケースについて検討した。

2.2 基本計算式

プランクトン増殖反応に関する速度定数Kは次式(1)の様に与えられる。

$$K = \ln(X_1/X_0) \dots \dots \dots (1)$$

式中、 X_1 、 X_0 はそれぞれ測定日のプランクトン濃度、測定日前日のプランクトン濃度である。

又、速度定数の栄養源濃度依存性は

$$K = -K_{MAX}/(2X_{cri}) * |X - X_{cri}| + K_{MAX}/(2X_{cri}) * (X - X_{cri}) + K_{MAX} \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。式中、 X は栄養源濃度、 X_{cri} は半値濃度の2倍、 K_{MAX} は最大速度定数である。(2)式は K_{MAX} に達するまでは速度定数は濃度に比例して増加し、 K_{MAX} に達した以降は濃度によらず一定値である事を示す。

本検討においては、 K_{MAX} として研究会で得られた代表例としての0.69を採用した。又、飽和濃度は代表例として、成分ごとに $N=10 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 、 $P=0.25 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 、 $Si=2.5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 、 $Fe=2 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ を採用した。

2.3 シミュレーション手法について

製鋼スラグおよび窒素供給源としての都市排水を連続一定速度で供給し、それらから供給される有効成分である鉄、珪素、りん、窒素の成分値に対して速度定数を(2)式で算出し、生成するプランクトン量を推定した。増殖するプランクトンに対し、Redfield's ratioを用い、消費される栄養

平成14年7月31日受付 平成14年10月11日受理 (Received on July 31, 2002; Accepted on Oct. 11, 2002)

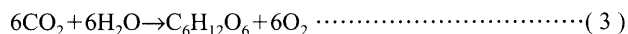
* 新日本製鐵(株)技術開発企画部(現:新エネルギー・産業技術総合開発機構)(Technical Development Planning Div., Nippon Steel Corp., now New Energy and Industrial Technology Development Organization)

*² 新日本製鐵(株)技術総括部(Technical Administration & Planning Div., Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku Tokyo 100-8071)

源を算出する。次に栄養源の消費と供給バランスから、次ステップの速度定数を決定する。尚、栄養源供給方式としては、連続供給方式で検討した。計算の時間の最小単位としては1日を用いた。計算シミュレーションフローをFig. 1に示し、前提となるスラグ組成をTable 1に示す。

2.4 光合成利用効率制約について

シミュレーションを実施するにあたり、増殖速度の上限値を設定するため、光合成による理論限界を把握しておく必要がある。代表値として、日本の直達日射量は15.5 M·J/m²/dを用い、以下の光合成反応により



$$\Delta G = 2.87 \text{ M} \cdot \text{J/mol}$$

CO₂ 1モルあたりでは2.87/6=0.48 M·J/mol

15.5/0.48=32.4 mol/m²/d

32.4×44=1428 g-CO₂/m²/d

光合成エネルギー変換効率=0.26 (太陽光の平均波長550 nmに対応する数値), 太陽光中の光合成利用可能波長は全太陽エネルギー中約45%とすると, 総合変換効率は10~12%となる。従って, CO₂固定量は143~171 g-CO₂/m²/dとなり, これを上限値とした。

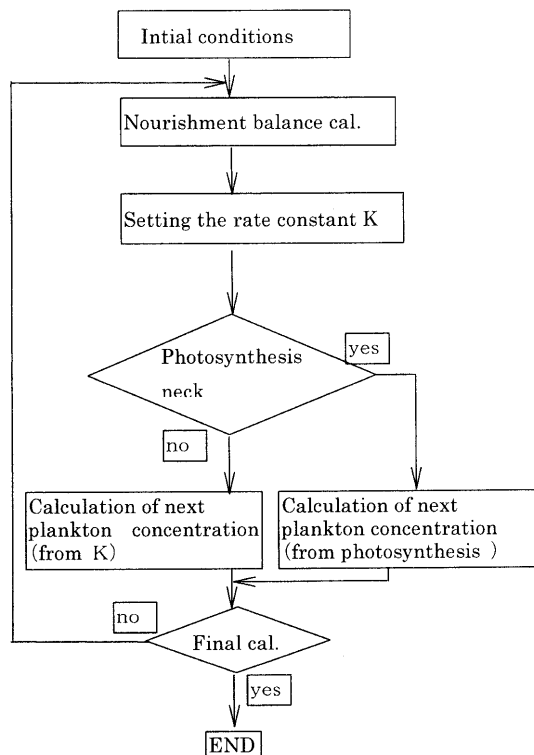


Fig. 1. Calculation flow.

Table 1. Chemical compositions of steelmaking Slag.

Components	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	FeO
weight%	45 wt%	15 wt%	5 wt%	17 wt%

2.5 検討ケース

対象成分としてN, Si, P, Feの4元素について, 太陽光によるプランクトンどうしの相互干渉を考慮しないケースと, 考慮するケース2ケースで検討した。相互干渉を考慮するケースについては, プランクトン濃度が100 μg/dm³まで培養すると, 成長と沈降がバランスし, 定常状態が形成されると仮定した。

2.6 スラグ散布費用の算出方法

スラグ散布に要する主な費用を以下示した。

- (1) 発生事業所内事前加工コスト
 - ・粒度調整費
 - ・比重調整費
 - (2) 陸上輸送費
 - ・輸送費
 - ・船積み費
 - (3) 海上輸送費
 - ・往路輸送費
 - ・散布費 (主に時間で評価)
 - ・復路輸送費
- 各算出項目はTable 2, 3に示した前提にもとづいて算出した。

2.7 総合コスト算出の考え方

スラグ散布にあたりそのコストは散布時間に大きく依存する。そのためTable 4, 5, 6に示した種々の散布の条件にもとづきコスト計算を行った。

3. 結果および考察

3.1 増殖シミュレーションによる投入方法の最適化

一次反応モデルを用い, 反応速度定数を用いて, プランクトンの増殖挙動をシミュレートした結果をFig. 2, 3に示す。

Fig. 2には, 太陽光に関する相互干渉を考慮しない仮想的なケースの結果を示したが, 栄養源濃化が進行するとともに, プランクトンは幾何級数的に増殖し, それに伴い次第に栄養源が減少していく。栄養素が消費され尽くすと, 増殖は停滞し, 栄養素の蓄積後, 再び増殖を開始。その繰り返しとなる。供給速度が充分大きい場合には, 増殖/停滞の振幅が大きくなり, その上限は光合成ネック(143~171 g-CO₂/m²/d)の領域に達する事もある。

Fig. 3に, 太陽光に関するプランクトンの相互干渉を考慮したケースの計算結果を示した。相互干渉がない場合の複雑な状況に至るまでにプランクトン濃度が頭打ちになり, その後は定常状態を保つ。

これら2つのケースに対し, 栄養源供給速度をパラメータとして, シミュレートした結果をFig. 4に示した。所要原単位は太陽光に関する相互干渉を考慮しない仮想的なケースでは, スラグ供給速度の増加により, 増殖が進行す

Table 2. Assumptions of study (1).

Objects of Transportation • Specific weight of transported material= 1. 0 g/cm ³ • Particle size of Slag ; Mean size of low material= 5 mm φ • Scattering time=2hrs, 3 days • Ship capacity= 5 0 0 0 t /ship • Mean transportation rate= 1 2 knot • Loading condition ; Bucket type • Loading rate=4 0 0 0 t /day

る分低減し、光合成による上限値で頭打ちが生ずる以降は、逆に増加する。ここで、有効反応深さについては、実態調査を待つべきところであるが仮定として10mおよび100mの2つの数値を用いて試算した。一方、太陽光に関するプランクトンの相互干渉を考慮したケースでは、短時間で相互干渉を起こす時期に達するため、プランクトンが減少し

Table 3. Assumptions of study (2).

Item1	Item2	Conditions	Note
Pretreatment	Grinding cost	Crush energy=K/√(Df/Di) Di : mean diameter before Df : mean diameter after	Bond's law
	Specific controll	Energy=600Mcal	
	Strength controll	Binder cost	(maker hearing)
Land transportation	Transportation cost	Specific Weight= 1	
	Loading cost	"	
Sea transportation	Go	Calculated on the condition 12 knot	Actual results of 4 0 0 0 t class ship
	Scattering	Calculation from required time	"
	Return	Calculated on the condition 12 knot	"

Table 4. Case of total cost calculations.

Case	Method	Cost calculation item	Size
1	Hollow nodule	Utility only	- 1 mm
2	Hollow nodule	Utility & binder	- 1 mm
3	Fine grinding	Grinding cost	- 0. 0 5 mm

Table 5. Case of scattering time 3 d.

Scattering time=3 Days	Transportation distance				
	100km	200km	300km	400km	
1. Conditions					
Distance sea miles	54.00	107.99	161.99	215.98	km/sea miles 1.852
Loading t/voyage	4000	4000	4000	4000	
Rate (loading) knot	12	12	12	12	
Rate knot	12	12	12	12	
2. Cycle time					
Loading Hr	10.0	10.0	10.0	10.0	t/Hr 400
Shipping Hr	4.5	9.0	13.5	18.0	
Scattering Hr	72.0	72.0	72.0	72.0	
Shipping(return) Hr	4.5	9.0	13.5	18.0	
Total Hr	91.0	100.0	109.0	118.0	
3. Cost calculation					
Total k¥/M	34657	34681	34701	34718	
Shipping cost ¥/t	1200	1320	1440	1560	

Table 6. Case of scattering time 2 h.

Scattering time=2 hours	Transportation distance				
	100km	200km	300km	400km	
1. Conditions					
Distance sea miles	54.00	107.99	161.99	215.98	km/sea mile 1.852
Loading t/voyage	4000	4000	4000	4000	
Rate (loading) knot	12	12	12	12	
Rate (empty) knot	12	12	12	12	
2. Cycle time					
Loading Hr	10.0	10.0	10.0	10.0	t/Hr 400
Shipping Hr	4.5	9.0	13.5	18.0	
Scattering Hr	2.0	2.0	2.0	2.0	
Shipping(return) Hr	4.5	9.0	13.5	18.0	
Total Hr	21.0	30.0	39.0	48.0	
3. Cost calculation					
Total k¥/M	34657	34681	34701	34718	
Shipping cost ¥/t	280	400	510	630	

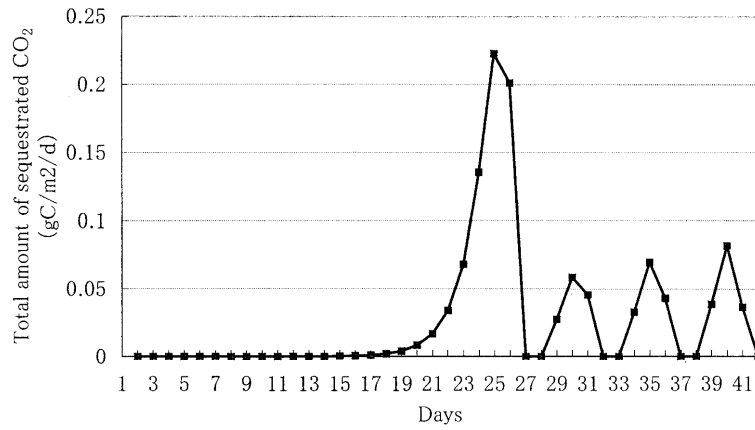


Fig. 2. Total amount of sequestered CO₂/in case of interaction of planktons free.

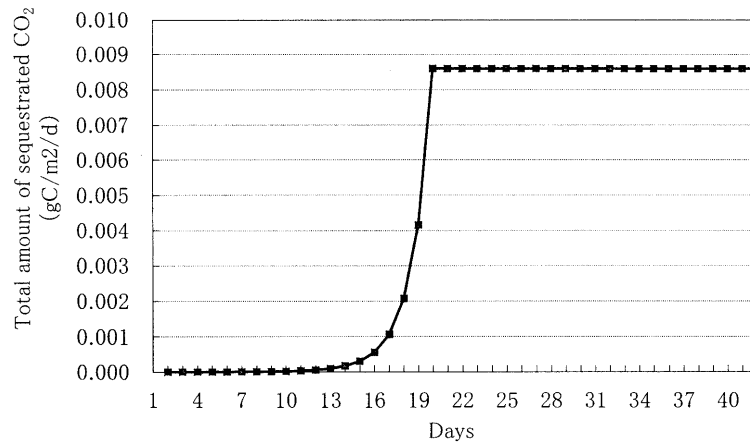


Fig. 3. Total amount of sequestered CO₂/in case of interaction of planktons.

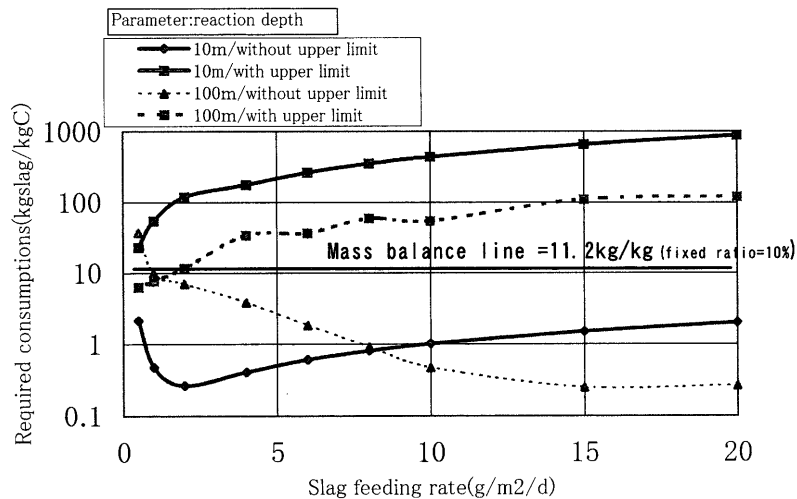


Fig. 4. Required slag consumptions against slag feeding rate/in case of neck of phosphorus.

供給した栄養源が有効に利用できなくなる。そのため投入した栄養源に無駄が生じ、スラグ供給速度の上昇で所要原単位は悪化する。所要原単位は本来、Redfield's ratioで規定されるマスバランスで規程されるものであるため、一定

であるが、上記計算から、スラグの供給速度には太陽光に関するプランクトンの相互干渉を考慮したケースのシミュレート線と、マスバランス線の交点に対応する適正投入速度の存在が考えられる。

Table 7. Case of Si neck.

Slag consumption=4700kg/tC

Type Scattering time Size	Case1 Hollow nodule 2hours -1mm		Case2 Hollow nodule 2hours -1mm		Case3 Fine powder 3 days -0.05mm	
	¥/Tslag	¥/T·C	¥/Tslag	¥/T·C	¥/Tslag	¥/T·C
Grinding	800	3800	800	3800	8000	37600
Land transportation	800	3800	800	3800	800	3800
Sea transportation	630	3000	630	3000	1560	7300
Hollow treatment	2000	9400	5000	23500		0
Total		20000		34100		48700

Table 8. Case of P neck.

Slag consumption=1100kg/tC

Type Scattering time Size	Case1 Hollow nodule 2hours -1mm		Case2 Hollow nodule 2hours -1mm		Case3 Fine powder 3 days -0.05mm	
	¥/Tslag	¥/T·C	¥/Tslag	¥/T·C	¥/Tslag	¥/T·C
Grinding	800	880	800	880	8000	8800
Land transportation	800	880	800	880	800	880
Sea transportation	630	693	630	700	1560	1700
Hollow treatment	2000	2200	5000	5500		0
Total		4700		8000		11400

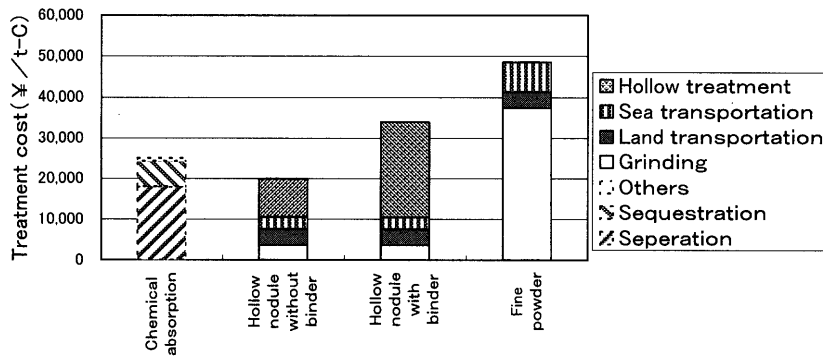


Fig. 5. CO₂ sequestration cost; in case of neck of Si/fixed ratio=100%.

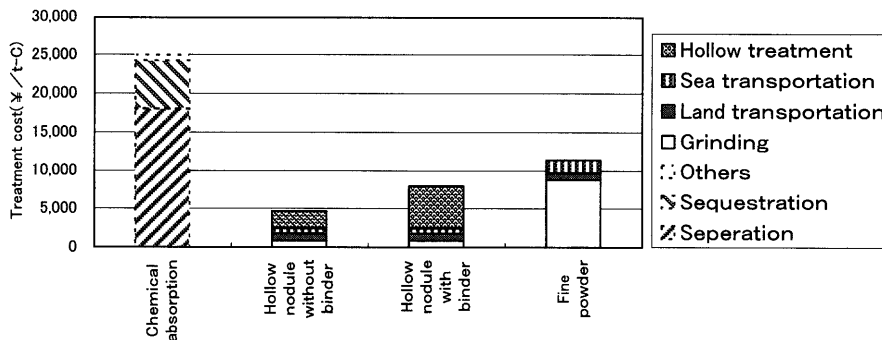


Fig. 6. CO₂ sequestration cost; in case of neck of P/fixed ratio=100%.

3.2 最適栄養源供給を支配する経済性指標

3.2.1 海上輸送について

変動要素の大きい海上輸送について具体例で記述する。Table 5, 6に示されるごとく輸送費用は投入時間の影響を大きく受ける。

3.2.2 総合コストについて

Table 2-6で示した各条件に対して算出した総合コストに

ついて、SiとPの供給が律速となる場合の結果についてTable 7, 8に示した。

3.2.3 他方式との比較

CO₂固定率を100%で考えた場合のCO₂固定化費用⁹⁾を、スラグ散布方式と吸着固定方式と比較した結果をFig. 5, 6に示す。Fig. 5に示した様にSi供給がネックの場合において、スラグ散布方式が化学吸着法より安価に実施できる可

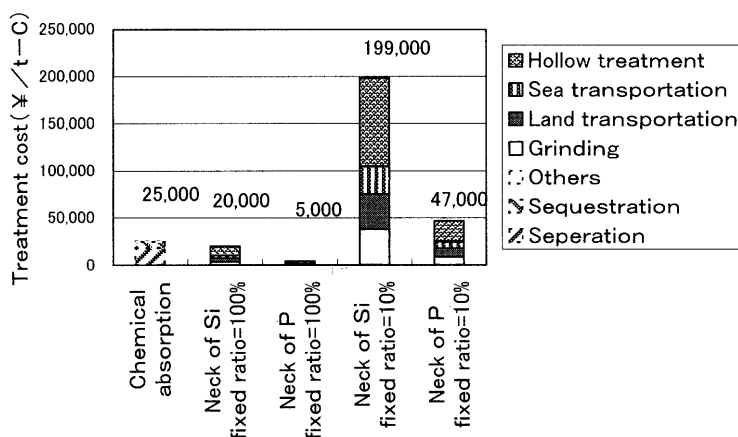


Fig. 7. CO₂ sequestration cost; in case of hollow nodule without binder.

能性がある。Fig. 6に示したP供給がネックの場合は、状況は更に改善される。ただし、Fig. 7に示すごとく、CO₂固定率を10%とした場合、Siネック、Pネックの双方においてコストは化学吸着法を上回るため、CO₂の固定率を向上させる事が今後の重要な課題となる。

3・2・4 今後の実用化課題

上記対策を集約すると①栄養素連続供給方式としての経済性改善②固定率の改善に集約される。本検討は製鋼スラグを用いたプランクトン増殖に関する実用化に向けた可能性をマクロに検討したものであり、手法は極めてオーソドックスなものに限定して検討したが、ここで得られた着眼点を中心に、周辺新技术を取り込んだ更に効率の良い方法を探る事が今後の課題である。

4. 結言

一次反応モデルを用い、反応速度定数を用いて、プランクトンの増殖挙動をシミュレートした。

(1) スラグの供給速度には太陽光に関するプランクトンの相互干渉を考慮したケースのシミュレート線と、マスバランス線の交点に対応する適正投入速度の存在がある。

(2) 製鋼スラグの海中散布に関する費用概算の検討を

行い、以下の結論を得た。

- ① プランクトン増殖速度に対応したスラグの適正供給速度を決定するための実機条件を検討し、CO₂の固定率100%の条件では吸着固定化技術との比較においても、スラグ散布方式がより安価で実行できる可能性がある事が確認された。
- ② 今後は固定率の見極めや、要素技術の進展に併せて実用化課題の絞り込みが重要である。本結論を定量的に究めるためには、増殖特性、再分解特性に関しての更なる研究進捗に伴い、ロジスティクスに関する最適化研究もレベルアップしていく必要がある。

文 献

- 1) 日野光元：第44・45回白石記念講座、日本鉄鋼協会、東京、(2001)、99。
- 2) 平成12年度製鋼スラグを用いた二酸化炭素の削減・固定化に関する調査報告書、日本機械工業連合会、日本鉄鋼連盟、東京、(2001)。
- 3) 炭酸ガス対策の新展開、東レリサーチセンター、東京、(1993)。
- 4) 製鋼スラグを栄養源として利用した海洋植物プランクトン増殖によるCO₂固定化研究会中間報告会、日本鉄鋼協会、東京、(2001)。
- 5) 平成12年度二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書、新エネルギー・産業技術総合開発機構、東京、(2001)、216。