

海洋バイオマスを製鉄プロセスで利用する炭素循環プロセスの開発

研究者代表 中部大学工学部機械工学科 教授 行本正雄

1. 緒言

地球温暖化により、極地の氷の減少、異常気象や生態系に対する影響など様々な問題が起きつつある。地球温暖化の原因は温室効果ガスの増加、中でも排出量が圧倒的に多い二酸化炭素(以下 CO_2)が一番の原因である。 CO_2 は地球温暖化問題の温室効果ガスとして約 60%の寄与率を示している。よって化石燃料の燃焼による CO_2 の排出削減は地球温暖化の進行を止めるためには必須であり、 CO_2 の削減方法の一環として、火力発電所等の排出ガス中の CO_2 を有効利用して、藻類の培養を行い、バイオエタノールを製造する計画が有望視されている^{1),2)}。

本研究では、製鉄所から排出される CO_2 を含んだ排ガスを海水に溶解し、 CO_2 を未利用の海洋バイオマス(昆布・藻類)に固定させ、温室効果ガスを削減する。また高濃度に溶解した CO_2 と排温水より急増殖したバイオマスを炭素源として利用し、資源の節約を図るプロセスの提示と最適設計を提案するものである。

2. システムの概要

藻類培養及びエネルギー生産システムの概略を図 1 に示す。

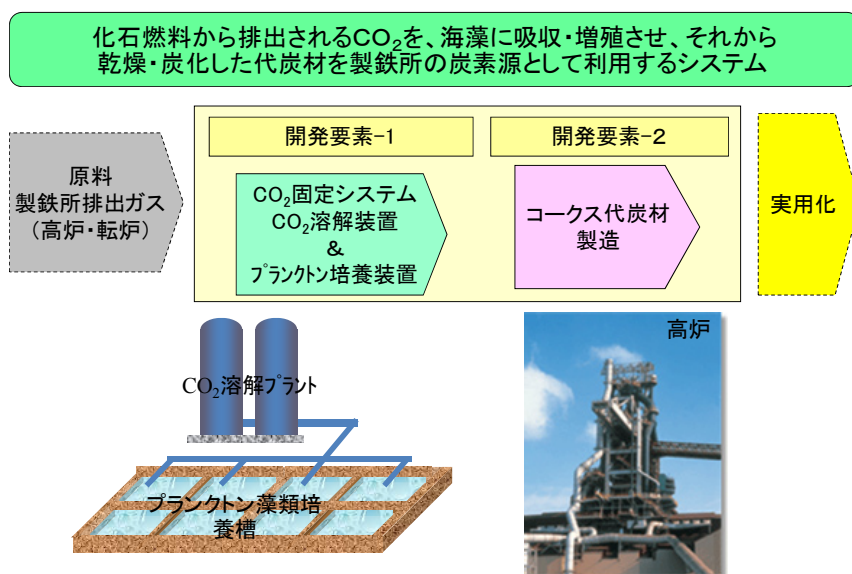


図 1 システム概略図

まず、第一工程として、製鉄所の排ガス中に含まれる CO_2 を回収して、内水面の海水に溶解させる。その海水を用いて藻類の培養を行い、藻類の光合成によって CO_2 を吸収させる。その後、藻類がある程度成長した段階で回収する。次に第二工程として、回収した藻類を乾燥・炭化により炭材を製造し、高炉に吹込んでコークスの代替として利用する。乾燥などは廃熱を有効利用する。

3. 模擬排ガスの溶解実験

3. 1実験装置

実験装置の概略図を図 2 に示す¹⁾。装置は無気泡溶解装置(酸素ファイター:OD-110)³⁾またはマイクロバブルノズル(AJI-251)、計測機器として多項目水質計(WOC-24)、炭酸ガス濃度計(CGP-1)、ガスボンベ、水槽、水中ポンプで構成されている。溶解方法はマイクロバブル溶解と無気泡溶解の 2 種類で行う。マイクロバブルノズルは水を流すとガスを吸い込むエジェクタ方式のノズルを使用する。無気泡溶解装置は、ガスを充満させたタンク内に水を通すことにより溶解液を作る装置で、タンクより排出された溶解液には気泡がない。またタンク内の圧力を調整することにより飽和溶解度を設定することができる。

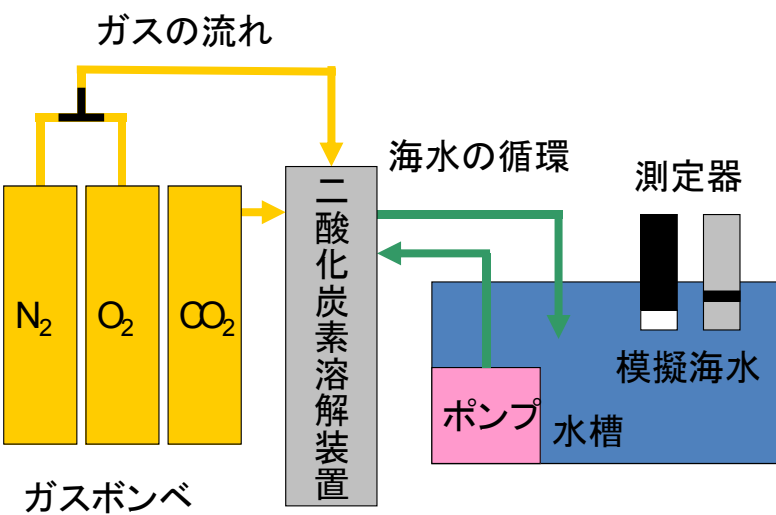


図 2 実験装置概略図

実験は水道水における溶解実験を行う。溶解実験の実験条件を表 1 に示す。

表 1 溶解実験の実験条件

水温	25℃
使用ガス	CO ₂ ,N ₂ ,O ₂
混合比	CO ₂ :N ₂ =20:80,50:50,100:0
	CO ₂ :N ₂ ,O ₂ =20:75:5
ガス圧力	0.15MPa
ガス流量	10L/min

水温が 25℃の水道水に、CO₂、N₂の 2 流体混合ガスと CO₂、N₂、O₂、の 3 流体混合ガスの、マイクロバブルおよび無気泡溶解装置による 20 分間の溶解量を測定する。混合比率の差を解析するため、それぞれ比率を、2 流体では CO₂:N₂=、20:80、50:50、100:0 に設定する。3 流体の混合比を CO₂:N₂:O₂=20:75:5 に設定する。この 3 流体の混合比は、火力発電所の排ガスを想定している。ガスは 0.15MPa (ゲージ圧力)の圧力、10L/min の流量で装置に送り込む。また無気泡溶解では、長時間ガスを流し続けていると装置内にガスが溜まって組成が変化するため 2 分に 1 回、1 秒間ガス抜きを行う。1 分毎に溶存酸素量、pH、全炭酸量を測定する。

3.2 実験結果と考察

マイクロバブルと無気泡溶解を用いた溶解実験の全炭酸量と溶存酸素量と pH の 20 分後の値を図 3～5 に示す。

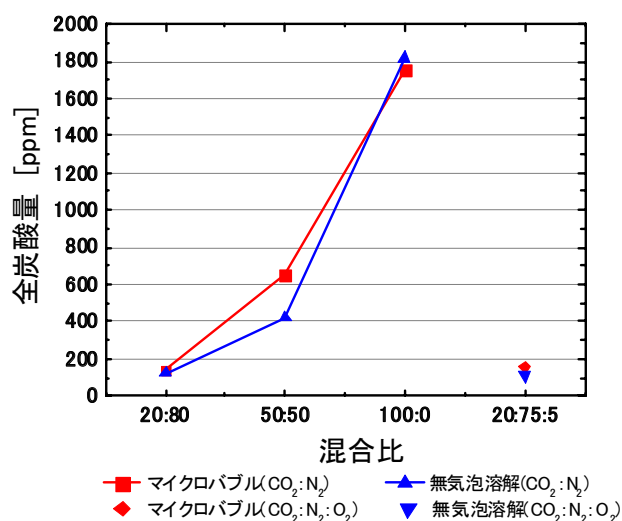


図 3 全炭酸量比較

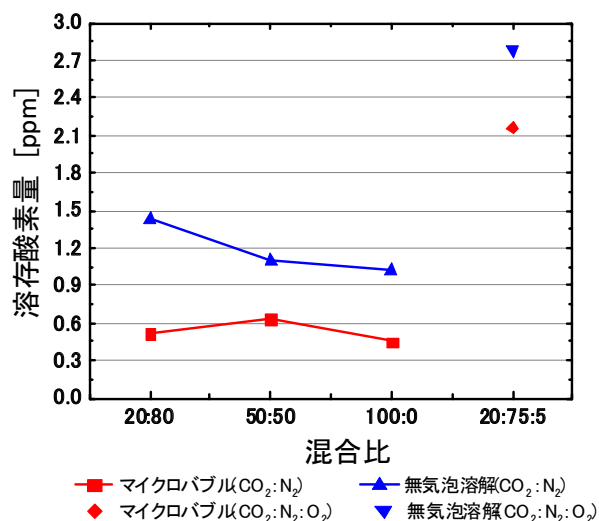


図 4 溶存酸素量比較

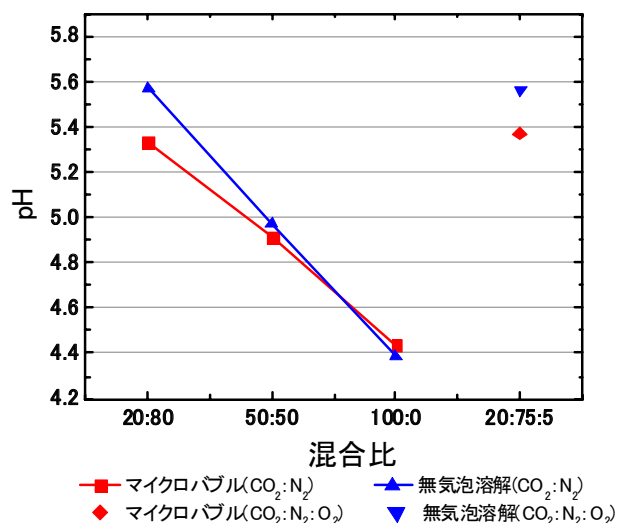


図 5 pH 比較

図 3 より、全炭酸の溶解量は、マイクロバブルと無気泡溶解ともに、CO₂の混合量の増加とともに大きい。3 流体においても、マイクロバブルと無気泡溶解の間に差は見られず、CO₂:N₂=20:80 とほぼ同じ値となった。

図 4 より、溶存酸素量は、マイクロバブルも無気泡溶解とも時間とともに、ほぼ一定値まで下がったが、マイクロバブルに比べて無気泡溶解の値は、2 倍程度高い結果となった。また 3 流体では、混合ガス中に酸素が含まれているため、2 流体に比べ、溶存酸素量は無気泡溶解で約 2 倍、マイクロバブルで約 3 倍高い値となった。

図 5 より、pH は、どちらの溶解方法でも CO₂の混合量が多いほど低い値となり、直線的に減少した。全炭酸の溶解量と pH は CO₂の混合量に依存している。

以上の実験結果から、藻類が夜間の呼吸に必要な溶存酸素は、大幅に減少することが判明し、藻類の培養条件として CO₂溶解は日中に実施すべきことと、pH が低下するため、pH の調整または CO₂溶解量の調整が必要になることが予想できる。

4. CO₂の溶解実験によるバイオマスの増殖実験

CO₂添加による藻類（ホソエダアオノリ）の増殖率向上に関する予備実験の装置概要を図6に、実験状況を図7に示す。図8、9に実験結果を示す。栄養分とCO₂の添加(pH5.7)によって初期量0.2gが4日間の培養で2.7gまで増加しており、CO₂を添加しない対照区(pH7.9)の2.4gと比べて収穫量が約13%高くなった。高効率生産に寄与できる可能性があることが判明した。

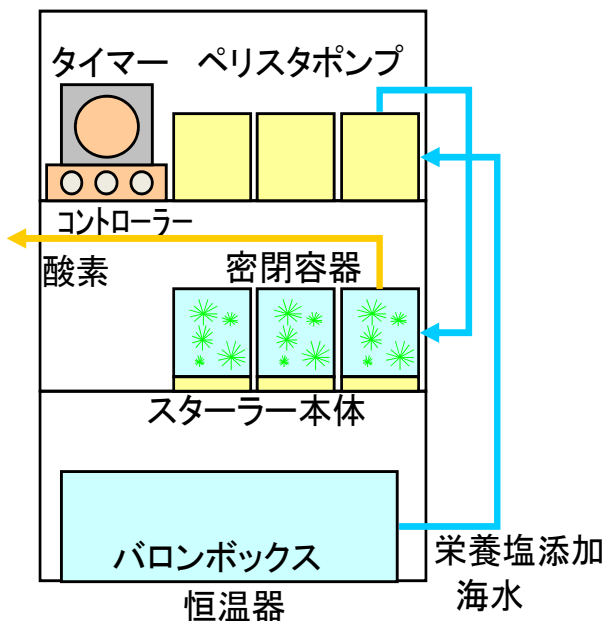


図6 海水循環培養槽の概要

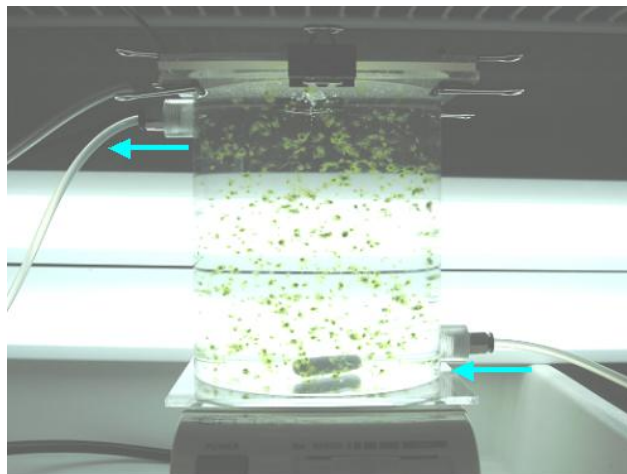


図7 ホソエダアオノリの培養予備試験の状況

1L密閉容器に培養液が矢印(水色)の流路で供給および排出

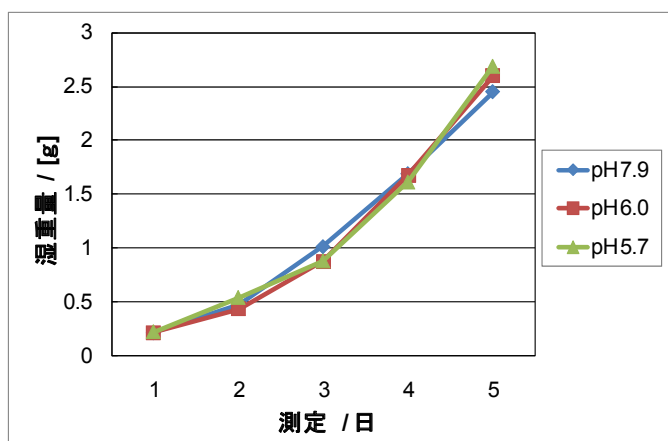


図8 湿重量増加比較

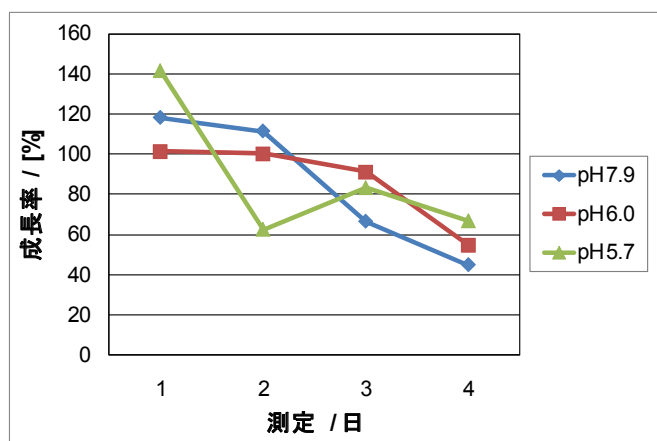


図9 成長率比較

5. 最適な海洋バイオマスの選定

共同研究者である平岡は藻類の成長に関する研究を進めている^{4),5)}。アオサとホソエダアオノリ(二種類)の藻類増殖について実用化した。ホソエダアオノリは前日比2倍から3倍という成長率を持つため、CO₂を高効率に吸収させるシステムに適している種である。アオサの物性値を表2に、従来から報告されている微細藻類とアオサの増殖速度(g/m²/日)を表3に示す。アオサの物性は90%が水分であり、残りはほぼ炭素と糖質である。微細藻類の成長速度はスジアオノリよりやや大きい、ホソエダアオノリは成長率が大いので微細藻類の2倍の増殖速度が期待できる。

表2 アオサの物性値

含水率	%	90
固体中炭素	%	40
固体中糖質	%	50
発熱量	MJ/kg-Dry	10.5

表3 藻類の増殖速度

藻類の増殖速度(乾燥藻体g/m ² 日)		
ア オ サ 類	スジアオノリ	18
	ホソエダアオノリ	40～50
微 細 藻 類	クロレラ(緑藻)	2～20
	スピルリナ	8～14
	ドナリエラ	5～25
	ポルフィリディウム	10～20

ホソエダアオノリは海水10ℓに対し1g程まで成長すると成長率が低下することが知られているので、その比率まで成長させた後、より大きな槽に移すことによって成長速度を維持することができる。高知の室戸岬の施設において、スジアオノリを一週間に10倍に成長させて藻類の養殖を行っている。生産されたアオノリは、食用として用いられている。室戸岬でのアオノリ養殖の商業システムの概要を図10に示す⁵⁾。

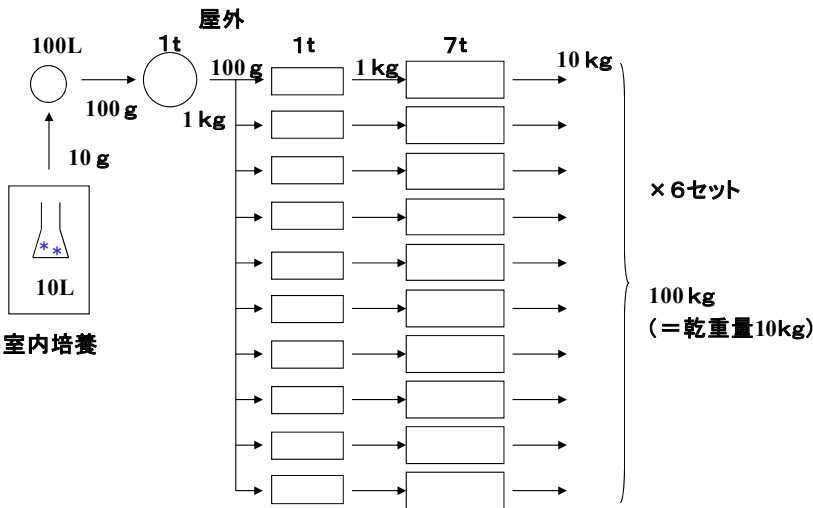


図10 アオノリ養殖のシステム概略図

藻類の成長方法については、従来の海藻種苗を固定する方法では高密度で繁殖できない、藻体の成長がばらつくといった問題があった。単位タンクあたりの収量を高めるためには高密度で浮遊養殖できる方法が必要であるため、孢子及び発芽体の集塊化による海藻養殖法である孢子集塊化法が開発された。孢子集塊化法を用いて集塊化させた藻類の写真を図 11 に示す⁵⁾。

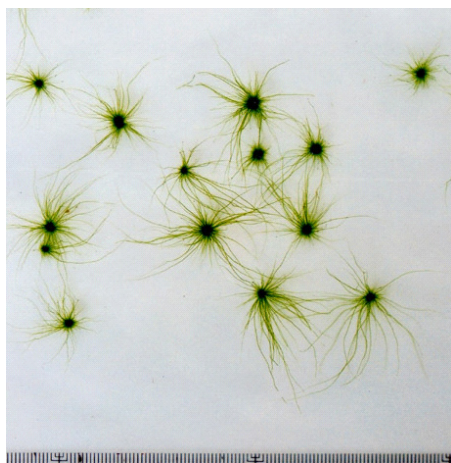


図 11 孢子集塊化法を用いた藻類

孢子の段階で複数の藻体が互いに連結するように実験室で操作し、孢子か発芽体の集塊を大量に作って養殖する方法である。

6. コークス代炭材の評価

高炉に吹込まれるコークスの代替(代炭材)としてアオノリ及びポリエチレンの熱分解挙動を測定した。TGA はディー・エイ・インスツルメント社の Q500 を使用した。アオノリとポリエチレンと石炭の熱重量減少のグラフを図 12 に示す。

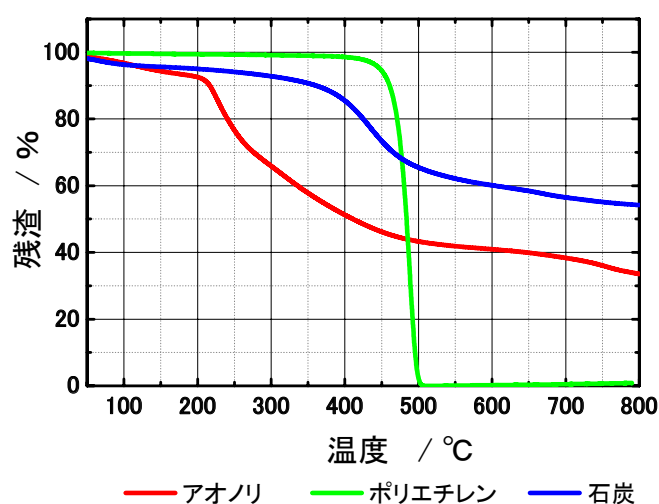


図 12 熱重量減少比較 (昇温速度 10°C/min)

熱重量減少開始時はアオノリと石炭はほぼ同じ挙動を示したが、200°C以上ではアオノリの熱重量減少が速くなった。

また本実験では発熱速度を測定するため、東洋精機製作所製の C3 タイプのコーンカロリメータを用いて水平燃焼試験を行った。試料は燃焼中に燃え広がらないようにアルミホイルで作った型に入れて輻射面以外を覆って試験を行った。コーンヒータから試料までの距離を 25mm とし、排気流量を $0.0240\text{m}^3/\text{s}$ 、輻射熱量を $50\text{kW}/\text{m}^2$ とした。発熱速度のグラフと各種状態時の藻類の写真を図 13、表 4 に示す。

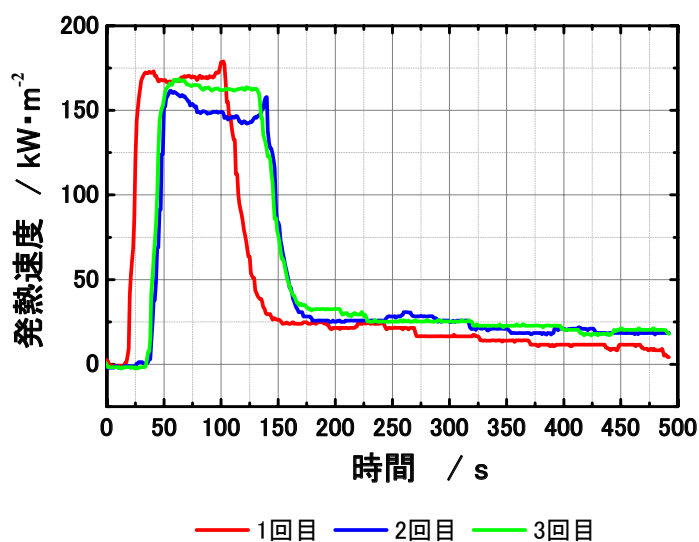


図 13 アオノリの発熱速度

表 4 各状態におけるアオノリの写真と重量

乾燥前	乾燥後	燃焼後
		
22.5g	5.1g	1.19g

空気中での燃焼挙動は木材と類似しており、炭化物残渣が観察された。乾燥条件を検討する必要がある。

7. 実用プロセスのライフサイクル評価

乾燥させた藻類を高炉に吹込んでコークスの代炭材として用いると仮定してLCA計算を行った。LCAの計算には社団法人産業環境管理協会製のJEMAI-LCA Pro ver.2.1.1を使用した⁶⁾。LCAのプロセスフロー図を図14、計算結果を図15、表5に示す。

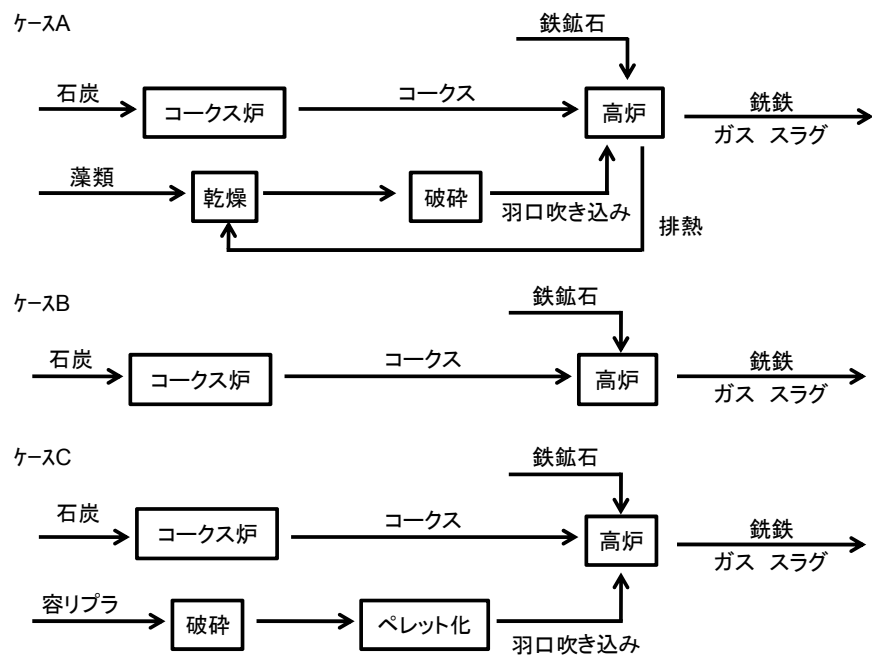


図 14 LCA のプロセスフロー図

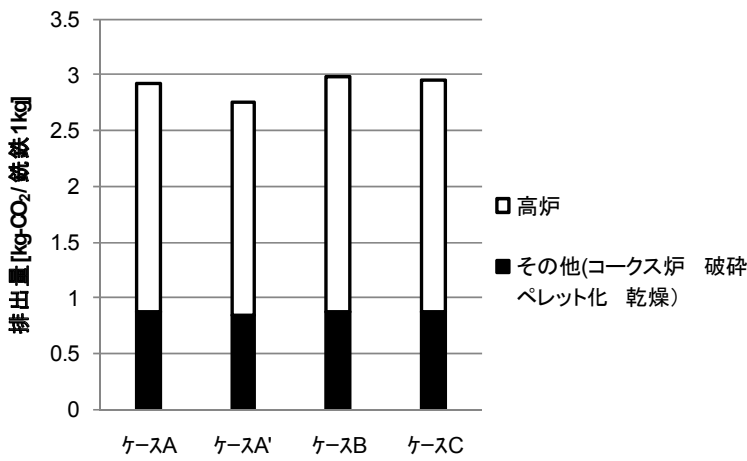


表 5 CO₂ の排出量(数値)

CO ₂ 排出量[kg-CO ₂ /銑鉄1kg]		
	高炉	その他(コークス炉 破碎 ペレット化 乾燥)
ケースA	2.057	0.866
ケースA'	1.920	0.838
ケースB	2.102	0.875
ケースC	2.087	0.867

図 15 CO₂ の排出量(グラフ)

ケース A は既存プロセスでの高炉処理、ケース B は廃プラスチックの代炭材利用(2%代替)、ケース C は乾燥藻類の代炭材利用(2%代替)、ケース C' はケース C の代替率を 10%とした。

計算結果より乾燥藻類を高炉に吹込んでコークスの代炭として利用(10%代替率)すると銑鉄 1kg 当たり 7.4% の CO₂ 排出削減が期待できる。

8. 結論

本研究では CO₂ 溶解と海藻培養について実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) マイクロバブルと無気泡溶解はいずれも CO₂ 混合量が多いほど高くなり、pH は低くなった。
- 2) 20 分後の全炭酸量は 2 つの方法で差異はなかった。
- 3) 溶存酸素量はマイクロバブルが低く、2 つの方式とも CO₂ 混合量が多いほど低い。
- 4) 孢子集塊化法を用いた CO₂ 添加による藻類の成長率は無添加に比べ約 13%高くなった。
- 5) 熱重量減少、燃焼試験の結果から、乾燥させた藻類は発熱量が低く、残渣が残るため高炉に吹込んで代炭材として利用する事は難しい。
- 6) 今後 CO₂ 溶解による藻類培養システムの実用化のため、多段式から一層式への改良、CO₂ ガスの分離回収、CO₂ 溶解の高効率化などを検討していく。

謝辞

本研究は JFE21 世紀財団研究助成事業の下で行った。

共同研究者の高知大学平岡雅規准教授には藻類増殖実験を担当頂き、また中部大学武田邦彦教授に貴重な助言を頂いた。

参考文献

- 1)行本正雄、吉川直樹、中島江梨香、武田邦彦;二酸化炭素等の無気泡溶解法による水中での炭素固定量の評価、日本エネルギー学会、第 17 回日本エネルギー学会大会講演要旨集、(2008)、308-309
- 2)平山伸也、海水性微細藻類を用いた CO₂ 固定とエタノール生産、日本機械学会、第 8 回動力エネルギー技術シンポジウム講演論文集、(2002)、245-248
- 3) 大栄株式会社ホームページ <http://www.daiei-tha.com/>
- 4) Masanori Hiraoka、Naohiro Oka;Tank cultivation of *Ulva prolifera* in deep seawater using a new “germling cluster” method、J Appl Phycol 20、(2008)、97-102
- 5) 平岡雅規; 海洋深層水を利用した海藻の大量タンク養殖システムの開発、Focus NEDO Vol.4 No.15、11-12
- 6)財団法人 日本容器包装リサイクル協会;プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討、(2007)、83-87