

エネルギー環境技術に貢献する電池技術¹

境 哲男²

Battery Technologies for Energy and Environmental Technologies

Tetsuo SAKAI

Research Institute for Ubiquitous Energy Devices, Advanced industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Since the first production of nickel-metal hydride battery in 1990 and Lithium-ion battery in 1992 the battery production of these advanced secondary batteries have increased rapidly, now comprising of 60% of the whole battery sales in Japan. The application of these batteries is now expanding from small portable appliances (Wh-class) to electric and hybrid vehicles (kWh-class) by scaling up the battery size and also improving the security and safety. Further scale-up of the batteries (MWh-class) is now going in order to utilize in the energy recovering system for rail road and also energy storage system for solar energy and wind power. The advanced battery technologies are one of the key issues for energy saving and new energy technologies.

Key words: Secondary battery, Hybrid vehicle, Energy saving technology

1. はじめに

1980年代から欧米において携帯電話の普及が始まり、現在では世界で約10億台の携帯電話が生産されるに至っている。その二次電池としては、当初はニッケル・カドミウム電池が利用されていたが、使用済み電池に対する環境規制や電池高容量化の要望の中で、我が国で1990年にニッケル水素電池が、1992年にリチウムイオン電池が商品化された。これら新型二次電池は、当初は高価で、性能も十分ではなかったが、携帯電話用途という短い商品サイクルの中で改良が繰り返された結果、性能向上と量産技術、低コスト化が進展して行った¹⁻³。2008年におけるこれら新型二次電池の生産金額は約5000億円と、我が国の全電池販売金額の60%を占めるに至っている (Fig.1)。

携帯機器用途で電池量産技術が確立され、電池の大型化と長寿命化も可能となり、1996年頃から電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)での利用も進んでいる。また、電池の更なる大型化により、鉄道車両の電力回生や、太陽光発電や風力発電の電力貯蔵用としての実証試験も進んでいる。このように電池技術は、エネルギーと環境

が調和した未来社会の構築において、大きな貢献が期待されている (Fig.2)。

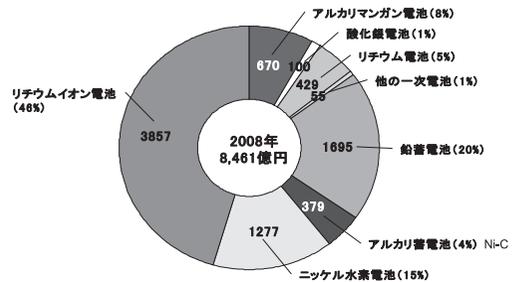


Fig.1 2008 battery sales in Japan

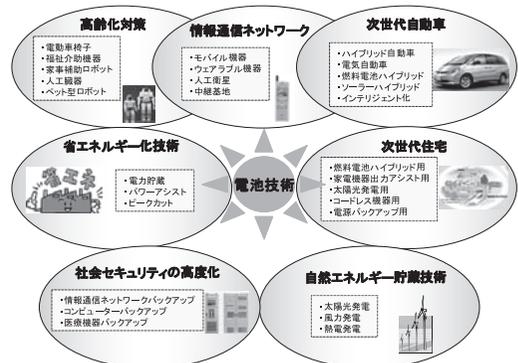


Fig. 2 Battery technologies for creating the future society

1. 平成 21 年 11 月 12 日 本会第 123 回例会において発表
 2. (独) 産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー部門
 平成 21 年 7 月 27 日受理

2. 省エネルギー技術と電池技術

携帯電話用途での電池技術の進展によって、電池の大型化(1-20kWh)と長寿命化(10年以上)、高出力化(1kW/kg以上)が図られ、ニッケル水素電池では、1996年に高性能電気自動車(EV)が、1997年には電力回生などにより燃費を2倍以上に向上させたハイブリッド自動車(HEV)が商品化された。EVは価格がガソリン車の3倍ということもあって普及は進まなかったが、HEVは低コスト化が一段と進展して、省エネルギー自動車の主流として、普及が急速に進んでいる。2010年には100万台(電池で約1000億円)の生産が、2015年には300万台の生産が予定されている(Fig.3)。

2009年から、従来のニッケル水素電池に比べて電池重量が約半分になるリチウムイオン電池を搭載した小型電気自動車の量産も開始され、近距離の営業用や集配用としての利用が予定されている。また、HEVに少し大きめの電池を搭載して家庭用電源で充電し、近距離ではEV走行できるプラグインHEV自動車の開発も進められている。ただ、本格的な電気自動車の普及のためには、現行の電池の数倍の高容量化と数分の1への低コスト化が必要であり、国家プロジェクトで次世代電池の研究開発が活発に行われている。

電池の更なる大型化(数MWh)によって、鉄道車両の電力回生用や路面電車の駆動用などの分野でも実証試験が行われている。地上蓄電設備を設置して、電車や地下鉄のブレーキ回生電力を回収して、これをピーク時に使用することで、20-30%の省エネルギー化を図ることができる。また、停電時には、蓄電池から電力供給して、最寄り駅まで力行することが可能となり、鉄道システムの信頼性や安全性の向上にも寄与できる。これら電力回生用途では、高出力化と長寿命化が重視され、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池、キャパシタなどの利用が進められている。また、太陽光発電や風力発電の電力貯蔵用、更には、次世代送電網(スマートグリッド)の大型蓄電設備としての利用も検討されている。

携帯機器用途では電池メーカーが同じ規格の電池を大量生産して世界中に供給するモデルであった。しかし、

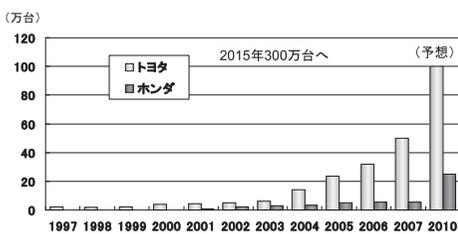


Fig.3 Production numbers of hybrid vehicles

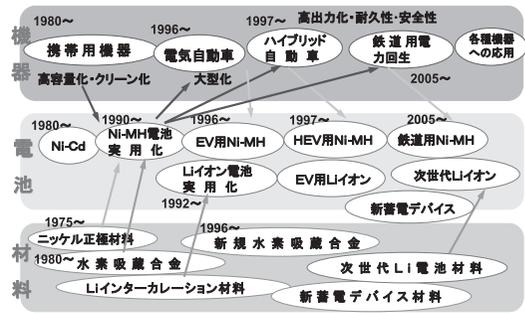


Fig.4 Collaboration of materials, battery and appliances

自動車用途や鉄道車両などの用途では、自動車メーカーや鉄道車両メーカーが主導して、独自仕様の電池を内製化し、利用機器の高性能化を図ることで、国際競争に勝ち抜く戦略をとっている。我が国では、機器開発と電池開発、材料開発の三位一体の開発体制によって、用途に応じた多様な次世代蓄電池の開発が可能であり、これが国際競争力の源泉ともなっている(Fig.4)。

3. 電池材料と資源問題

新型二次電池の実現を可能にした大きな要因は、1970年代の新物質の発見と、これを電池材料に利用したことにある。これによって電池の「高容量化」が大きく進展し、これを利用した携帯機器が生活の中に広く利用されるようになってきた。電池が人に密着するにつれて、その「安全性」に高い関心が寄せられるようになってきた。現在、クリーン自動車の分野でも電池の本格的な使用が始まっており、電池の大量消費社会に向けて、電池材料の資源的制約も危惧されるようになってきた。「脱希少資源」も考慮した次世代電池の開発も必要とされる(Fig.5)。

ニッケル水素電池では、1968年頃のLaNi₅系水素吸蔵合金の発見と、1980年頃からこれを電池負極に利用する材料技術が大きく進展した結果、1990年に商品化に至っ

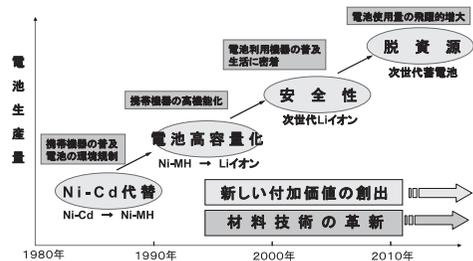


Fig. 5 Change of battery development potential

た。従来のNi-Cd電池に対して2倍以上の高容量化と有害元素含まないクリーン化が実現できたことで、民生用二次電池の主流となって行った。また、ハイブリッド自動車用の高出力電池として広く利用されている。従来、負極合金は、高価なCoを10%程度添加して微粉化を抑制することが不可欠であり、このCoが合金コストの半分を占め、また、自己放電の要因でもあったので、Coフリー化が求められていた。1996年、我が国で新規高容量合金(LaMg₂Ni₉など)が発見された結果、従来の1.5倍以上の高容量で、かつ、Coフリーでも長寿命化できる電池用新合金が開発された。この新合金を用いることで乾電池並に自己放電を抑制し、かつ、千回以上の使用が可能な乾電池代替用充電電池も商品化され、市場が急拡大している。材料技術の革新により電池の「常識」が変わり、新たな市場が生まれている。合金負極に用いる希土類元素は、地球上に豊富に存在する元素ではあるが、この20年間で生産国の寡占化が進み、現在、世界生産量の96%を中国に依存しており、資源的リスクが大きい。生産国の多様化や電池の完全リサイクル化などを推進することが必要とされる。

リチウムイオン電池では、1980年代に可逆的にLiをインターカレートできる4V系正極材料(LiCoO₂など)や黒鉛系負極材料、これを4Vで作動できる有機電解質材料などが開発され、1992年に商品化に成功した。ニッケル水素電池に比べて、重さが半分になることから、携帯電話やノート型パソコンなどで広く使用されることになった。この10年間で、電池充填密度は2倍以上に向上した結果、一方では発火事故のリスクが増大した。そこで、電池の安全性を高めるため材料開発が活発に進められている。セパレータでは、耐熱性を高めるために、耐熱性繊維やセラミックアなどとの複合化が進められている。負極では、従来の黒鉛系材料に比べて数倍の高容量化が可能なシリコン系やスズ系などの合金系材料の開発が、ナノ材料技術や薄膜化技術を駆使して進められている。正極では、リン酸鉄リチウム(LiFePO₄)など、高温でも酸素を放出しにくいポリアニオン系正極材料の開発が進められている。電解液では、難燃性で、かつ、Li dendriteが生成しにくいイオン性液体系電解質の開発などが行われている。これら材料技術の革新によって、高容量で、かつ、安全性に優れた次世代リチウムイオン電池が実現できるものと期待されている。

リチウムイオン電池の用途としては、携帯機器が中心であるが、希少資源であるコバルトやリチウムの使用量で見ると、2010年にはリチウムの世界生産量の9%が、コバルトではその32%が使用されることになる(Table 1)。リチウムの埋蔵量は、73%がチリ、13%が中国であり、また、コバルトの埋蔵量は、49%がコンゴ、19%がオー

Table 1 Materials for lithium ion battery

電力量	リチウム (トン)	コバルト (トン)	銅 (トン)	アルミニウム (トン)
100万kwh当たりの 必要量	130	1,110	680	357
2010年見込み 1800万kwh ^{a)}	2,340 (9%)*	20,000 (32%)*	12,240	6,426
2015年見込み 3000万kwh ^{b)}	3,900 (15%)*	33,300 (53%)*	20,400	10,710

a)2010年、小型電池(25億個)で約1800万kW、EV(約1万台)で約16万kWhと見込む。
b)2015年、小型電池(35億個)で約2520万kW、EV(30万台)で約480万kWhを見込む。
*2007年の世界生産量に対する割合。

リチウムは、埋蔵量の73%がチリ、13%が中国。
コバルトは、埋蔵量の49%がコンゴ、19%がオーストラリア。

ストリアであり、地域的な偏在が大きい。これらの資源的なリスクをどのように回避するかが、今後の電池利用技術の発展において重要となっている。

4. 将来展望

新型二次電池は、1990年から小型携帯機器用途(数Wh)での実用化により、高容量化技術や量産技術が大きく進展した。次に、1996年頃からEVやHEV用途(数kWh)の実用化で、長寿命化と高出力化、電池温度の管理技術が大きく進展した。更に、2006年頃から鉄道車両の電力回生用や自然エネルギーの電力貯蔵用(数MWh)として、大電流(数千A)放電や熱管理技術などが進展している(Fig.6)。

この20年間、多様な材料技術や電池技術のたゆまない変革によって、小型から大型まで使用できる高性能で安全性の高い汎用二次電池にまで仕上げることができ、現在、エネルギー環境技術の分野で大きな貢献をしつつある。100年ぶりに、鉛電池やニッケル・カドミウム電池に代替できる、高性能な汎用二次電池を実用化できたことは、人類の歴史の中で画期的なイノベーションといえるであろう。

今後とも、電池分野で世界をリードするためには、材

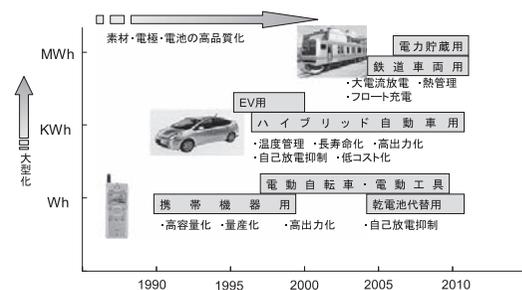


Fig.6 Scaling up of battery and progress in applications

料技術の革新が不可欠である。ただ、公知材料の改良研究ではなく、資源問題も考慮しながら、高性能化が可能な新材料の創製・探索研究を地道に行う「新物質戦略」が求められる。

References

1. “Advanced Technologies for Ubiquitous Energy” ,

edited by T. Sakai T & T. Kobayashi, CMC (2006)

2. “All Solid State Batteries” , edited by S. Kanamura, Science & Technologies (2007)

3. “Material development for Improving the safety and performances of lithium ion battery” , Jyohou kikoh (2008)

超高温メタン発酵システムの開発¹

津野 洋²・日高 平²

Development of hyperthermophilic methane fermentation system

Hiroshi TSUNO and Taira HIDAKA

Department of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract

To solve global warming and energy problems, anaerobic digestion of organic wastes will be helpful. Hyperthermophilic (higher temperature than traditional thermophilic 55°C) fermentation processes have possibility to provide improved performance. Laboratory scale reactors were operated continuously fed with artificial kitchen waste and waste activated sludge, and microbial community was analyzed.

The appropriate temperature for methane fermentation was 55°C, but at the acidogenic reactor, solubilization efficiencies of COD, carbohydrate and protein at 70°C were higher than those at 55°C by around 10%. The system of acidogenesis at 70°C and methanogenesis at 55°C was stable and well-functioned. Different microbial communities were obtained under different temperature conditions. The present study proved that the hyperthermophilic system was advantageous for treating organic wastes.

Key words: Methane fermentation, Hyperthermophilic, Kitchen garbage, Sewage sludge, Microbial community

1. 結 言

ディスポーザ対応下水道により、都市内で発生する生ごみを下水道から収集し、都市や地域内で資源を循環利用する一元化下水道システム^{1,2}の要素技術として、本研究グループでは、55°Cで活動する高温細菌による生ごみの有機酸発酵・メタン発酵技術およびそれらの反応器内の微生物群集解析技術の開発を行ってきた^{3,5}。溶解化・酸発酵過程とメタン発酵過程を1槽で行う1槽式メタン発酵プロセスと別々の槽で行う2槽式メタン発酵プロセスについて安定的操作法を開発している。人工生ごみを用いた実験結果により、本開発システムでは1槽式でも槽式でも、20gCODcr/(L・d)の負荷率までCODcrベースで80%を超えるメタン変換率が得られ、1kgの負荷CODcrあたり300L(1kgの負荷VSあたり490L)のメタンガスが発生していることが示された。有機酸の蓄積・変動状況から2槽式での運転の方が、操作は複雑であるが、若干安定性が良いことも示された。一方、地球上には、火山活動などにより80°C以上の環境が多数存在し、

そこで活動する微生物群も報告されており、超高温処理による可溶性技術の研究が行われている^{6,7}ものの、生ごみや下水汚泥を対象とした超高温処理による酸発酵技術の開発例は見られない。そこで本研究では、65°C以上の超高温嫌気性消化工程に着目した。エネルギーの回収、病原菌死滅および難分解性物質の分解などの観点から、超高温嫌気性消化工程により、既存の技術の問題点を改善できることが期待できる。また、処理に関わる微生物群について、従来の分離・培養に基づく微生物群集解析手法は、嫌気性微生物群に対して適用困難であり、分子生物学的手法が着目されている。

本研究の目的は、生ごみおよび下水汚泥を対象として、超高温酸発酵槽、ならびに超高温メタン発酵槽あるいは高温メタン発酵槽で構成された超高温メタン発酵工程を開発するために、実験室規模の連続実験を行い、その処理特性を評価しながら、分子生物学的技術を用いて、反応に関わる微生物群を遺伝子レベルで敏速に解析することである。

2. 実験方法

1. 平成21年11月12日 本会第123回例会において発表
2. 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
平成21年8月9日受理

(1) 生ごみの処理(実験A) 実験に用いた実験装置の概要をFig.1に示す。本工程は、70°C~80°Cで運転した

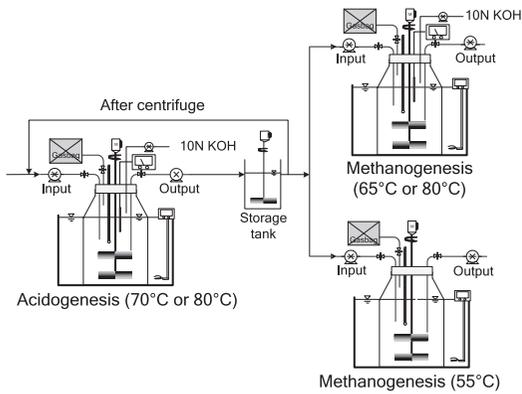


Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Components of artificial kitchen waste

(Acid fermenter)			
Run	A80 KG-a	A80 KG-b	A70 KG-a
Temperature (°C)	80	80	70
TS (%)	9.5	9.8	9.6
VS (%)	8.9	9.2	9
OLR (g COD/L/d)	22.4	27.9	18.2
HRT (d)	5	4	8
SRT (d)	5	4.2	11.6
Sludge return	No	Yes	Yes

(Methane fermentation)						
Run	M65 KG-a	M70 KG-a	M73 KG-a	M76 KG-a	M80 KG-a	M55 KG-a
Temperature (°C)	65	70	73	76	80	55
HRT (d)	30	30	30	30	30	120
OLR (g COD/L/d)	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	0.97
pH	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	8.08

Table 2 Operational parameters for treatment of artificial kitchen waste

Parameters	Total	Soluble
TS (g/L)	189	-
VTS (g/L)	179	-
CODcr (g/L)	292	104
NH ₄ ⁺ -N (mgN/L)	-	72
TN (mgN/L)	4010	-
Carbohydrate (gGlucose/L)	145	79
Protein (gAlbumin/L)	55	15

Table 3 Components of substrate blend

Parameters	Total	Soluble
TS (g/L)	22-69	-
VTS (g/L)	21-52	-
CODcr (g/L)	24-68	3-12
NH ₄ ⁺ -N (mgN/L)	-	29-162
TN (mgN/L)	860-4490	-
Carbohydrate (gGlucose/L)	9-11	2-6
Protein (gAlbumin/L)	5-25	0-1

超高温酸発酵槽、ならびに 55°C および 65°C~80°C で運転した二つのメタン発酵槽で構成されている。各リアクターの有効容積は 6L であり、200 rpm で攪拌した。超高温を維持するため水溶性オイルを使用し、10N KOH で pH を設定値に維持した。運転条件を Table 1 に示す。酸発酵槽の水理的滞留時間(HRT: Hydraulic Retention Time)は 4~8 日であり、固形物滞留時間(SRT: Solids Retention Time)は 4.2~11.6 日である。また、比較のために、55°C で運転した高温酸発酵槽、および 55°C で運転した高温メタン発酵槽を組み合わせた実験も、有効容積 4.5 L の反応器を用いて行った。

本研究で使用した汚泥は、本研究での生ごみを対象とした高温嫌気性消化槽より採取した消化汚泥を種汚泥として用いた⁵。基質として用いた人工生ごみは、実際の生ごみの組成成分を参考にして決定し⁸、キャベツ 10%、ジャガイモ 10%、大根 10%、白菜 10%、ニンジン 10%、リンゴ 2.5%、オレンジ(皮)7.5%、バナナ(皮)10%、ご飯 10%、パン 2.5%、麺類 7.5%、挽肉 5%、魚 2.5%、卵 2.5% より成る。その組成詳細は、Table 2 に示すとおりである。そして、TS が約 10%になるように水道水で希釈して用いた。

(2) 生ごみと下水汚泥の混合処理(実験 B) 引き続き、生ごみと下水汚泥の混合基質を対象とした連続運転実験を行った。70°C で運転した超高温酸発酵槽、ならびに 35°C、55°C および 65°C で運転したメタン発酵槽を組み合わせで運転した(以下、それぞれ A70+M35、A70+M55、および A70+M65 と記す)。また、コントロール系として、高温酸発酵(55°C) および高温メタン発酵(55°C) を組み合わせで運転も同時に行った(以下、A55+M55 と記す)。混合基質の組成詳細は、Table 3 に示すとおりである。

まず、体積比で TS 9.8%の人工生ごみ 80%および TS 0.5%程度の余剰汚泥 20%を混合した基質による連続運転を 230 日間実施した(実験 B1)。基質の平均 TS は 22.4 g/L であり、VS 比で余剰汚泥は 15%程度である。酸発酵槽の HRT は 6.4~2.4 日、SRT は 8~3 日とし、有機物負荷率(OLR)を徐々に増加させた。ここでは微生物濃度を維持するために、遠心分離による汚泥の返送を行った。メタン発酵槽については、HRT を 20~8.5 日とした。

次に、濃縮余剰汚泥を用いて、人工生ごみに VS 比で余剰汚泥 80%程度以上を混合した基質による連続運転を 175 日実施した(実験 B2)。酸発酵槽の HRT および SRT は 3 日とし、余剰汚泥濃度を上げることで OLR を徐々に増加させた。基質の TS は 25~60 g/L 程度であった。メタン発酵槽については、HRT を 8.5 日とした。

Table 4 Treatment performance in Experiment A

(Acid fermenter)						
Run	A80 KG-a	A80 KG-b	A70 KG-a			
COD solubilization (%)	20.5	21.4	43.1			
Carbohydrate solubilization (%)	67	61	81			
Protein solubilization(%)	24.4	31	26.2			
(Methane fermentation)						
Run	M65 KG-a	M70 KG-a	M73 KG-a	M76 KG-a	M80 KG-a	M55 KG-a
CH ₄ yield (L/g VSadded)	0.27	0.09	0	0	0	0.37
CH ₄ conversion, COD base (%)	62.5	14.5	0	0	0	85.5
VS removal(%)	66.5	46.7	40.4	36.9	19.5	78.2

(3) 菌相解析 反応器内の微生物群集の解析を、千ら⁹と同様の分子生物学的手法(ランダムクローニング法)で試みた。DNA抽出は、DNeasy Tissue Kit(QIAGEN社)を用いた。電気泳動によりDNAを確認した後、それを鋳型DNAとしてPCRを行った(PTC-200, MJ research)。PCRは、TaKaRaのpremix taq酵素、ならびに大半の真正細菌・真核細菌・古細菌の16S rDNAを対象とするUniv.519F-Univ.1406Rプライマー¹⁰を用いて94℃、60℃、および72℃で各1分の、25サイクルを行い、900bpの目的バンドを確認した。回収・精製後、TA-cloningを行い、シーケンス解析(Univ.519Fプライマー)を行った。シーケンス解析は、タカラバイオのジェノミクスセンターのシーケンシングサービスを利用した。得られた塩基配列データは、Ribosomal Database Project II¹¹がオンラインアナリシスとして提供しているChimera Checkにおいて、キメラではないかどうかを確認した。次に、米国国立医学図書館(NLM, National Library of Medicine)の生物工学情報センター(NCBI, National Center for Biotechnology Information)のweb site (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)上で、キメラではないと判断された塩基配列データを検索クエリーとして相同性検索(Blastn)を行った。また、解析したクローンの中で塩基配列データが97%以上同じだと判断できるものに関しては、それらを一つのOTU(操作的分類単位, Operational Taxonomic Unit)としてまとめた。系統樹は、MEGA4¹²を用いて、NJ法により作成した。

3. 実験結果および考察

(1) 生ごみの処理 Table 4に、各条件での運転結果もまとめて示す。酸発酵槽では、タンパク質の可溶化率が24~31%であり、従来の55℃の酸発酵¹³より高効率であった。メタン発酵槽において、温度条件により、有機酸の蓄積がみられた。プロピオン酸は65℃で、酢酸は70-73℃で、酪酸は70℃で特に蓄積していた。また、55℃で蓄積した主な有機酸は酪酸であった。超高温酸発酵および高

■ 70℃ □ 55℃ ---Experiment B1
▲ 70℃ △ 55℃ ---Experiment B2

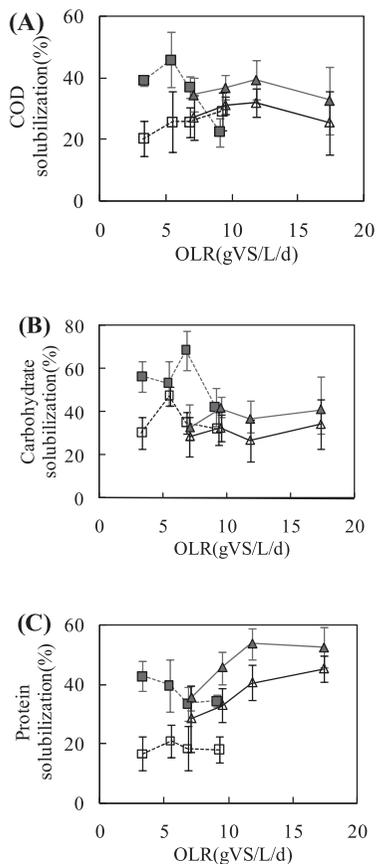


Fig.2 Solubilization efficiency in acid fermenters (Experiment B)

温メタン発酵を組み合わせた場合のメタン転換率はCODベースで約85%であった。メタン発酵槽の温度は55℃が最適であり、70℃以下の場合、メタンガスの生成が見られたものの、73℃以上に上げると、メタンガスは生産されなかった。

(2) 生ごみと下水汚泥の混合処理 実験Bでの酸発酵槽における可溶化率の比較をFig. 2に示す。横軸は、酸発酵槽におけるOLRを表している。COD可溶化率は実験B1およびB2で大きな違いがなく、70℃で30~40%程度、55℃で20~30%程度であった。ほとんどの場合で、70℃の時の可溶化効率が高かった。しかしながら、組成ごとの可溶化特性は異なっていた。炭水化物の可溶化は、OLRが低いときに高かったのに対して、タンパク質の可

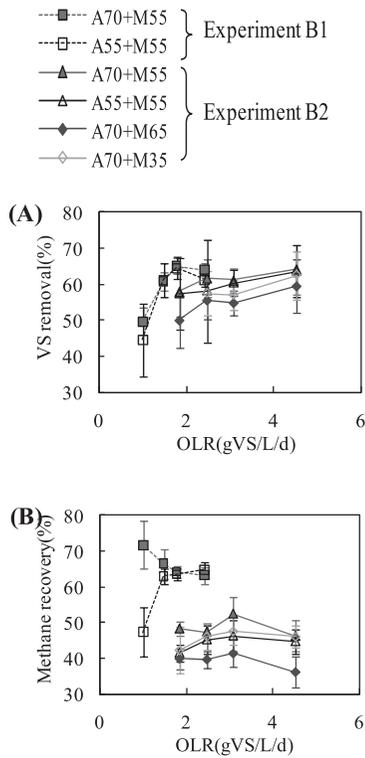


Fig.3 Methane fermentation efficiency (Experiment B)

溶化は、OLRが高いにもかかわらず実験 B2 で高かった。

実験 B でのメタン発酵成績の比較として、VS 除去率および COD 基準のメタン転換率を Fig. 3 に示す。横軸は、酸発酵槽およびメタン発酵槽全体に対する OLR を表している。余剰汚泥は分解されにくいことから、メタン転換率は実験 B2 で低かった。全体として、A70+M55 および A55+M55 いずれもメタン生成の観点からは優れていた。A70+M55 の場合、運転が安定しており、統計的にもメタン転換率などについて有利であることが示された ($P < 0.01$, 対応のある t 検定)。

(3) 菌相解析 超高温嫌気性消化工程での菌相解析結果は、Fig. 4 に系統樹としてまとめて示す。ここでは、占有率 3%以上の OTU およびその近縁種を選択してまとめた。各 Run における OTU を、占有率の高い順に 1, 2, ...、として Run 番号の後ろに付して示した。例えば、A80KG-a で検出された OTU は、A80KG-a1、A80KG-a2...、となる。メタン発酵槽でも可溶化や酸発酵処理が進行していたので、メタン発酵槽での菌相解析結果もあわせて示した。A80KG-a の群集解析結果からは *Clostridium* sp. 近縁種が約 40%、同様の *Clostridiales* に属する微生物に近い

配列が約 30%で、約 70%が *Clostridiales* に属する微生物であった。しかし、HRT が短くなった A80KG-b の実験結果からは *Lactobacillus sakei* および *Lactobacillus brevis* の近縁種がそれぞれ約 70%、および 12%検出され、*Lactobacillus* spp. 近縁種が多数を占め、*Clostridiales* が主に検出された A80KG-a の結果とは異なる微生物群集を示した。滞留時間が短くなったことによって *Clostridiales* から *Lactobacillus* spp. 近縁種に群集が変化したと確認された。A70KG-a では、*Bacillus coagulans* の近縁種が 30%と最も多くなり、温度を下げることで 55°C の高温酸発酵槽に近い菌相となっていた。

M55KG-a の群集解析結果は、大部分が Uncultured bacterium に近い配列であった。Uncultured bacteriumn 以外に 55°C の 1 相式高温酸発酵槽⁵でも検出された *Bacillus infernus* 近縁種が約 7%検出された。M65KG-a の主な微生物は Uncultured bacterium clone GMB4G10 および Unclutred compost bacterium clone 1B30 近縁種、M70KG-a の主な微生物は *Lactobacillus casei* および *Lactobacillus brevis* 近縁種、M73KG-a の主な微生物は *Lactobacillus plantarum* および *Lactobacillus casei* 近縁種、M76KG-a の主な微生物は *Lactobacillus casei* および *Lactobacillus brevis* 近縁種、そして M80KG-a の主な微生物は、*Enterococcus durans* および *Lactobacillus casei* 近縁種であった。温度を高くすることにより菌相に変化が見られ、73°C、76°C、80°C での主な微生物は *Lactobacillus* に属する微生物であった。なお、メタン生成は 73°C 以上では検出されておらず、酸発酵に関わる微生物群が主に検出された。

高温酸発酵槽では、処理が安定したと考えられる実験 A の 153 日目の *Bacillus coagulans* 近縁種が 90%、および *Lactobacillus sakei* 近縁種が 6%を占めていた。これらはいずれも乳酸菌として知られており、この時に反応器内の有機酸濃度の 90%程度が乳酸であったことと一致している。

これらの結果より、反応器の運転状況に応じた微生物群集が形成されていることが分かる。ランダムクローニング法は、手間や費用がかかるものの、各条件において鍵となる微生物群の定量により、反応器の運転操作に関連して議論できることが期待できる。

4. 結 言

本研究では、超高温メタン発酵工程を開発するために、生ごみおよび下水汚泥を対象とした実験室規模の連続実験を行い、その処理特性を評価しながら、分子生物学的技術を用いて、微生物群集の解析を試みた。

実験 A において、メタン発酵槽の温度は 55°C が最適で

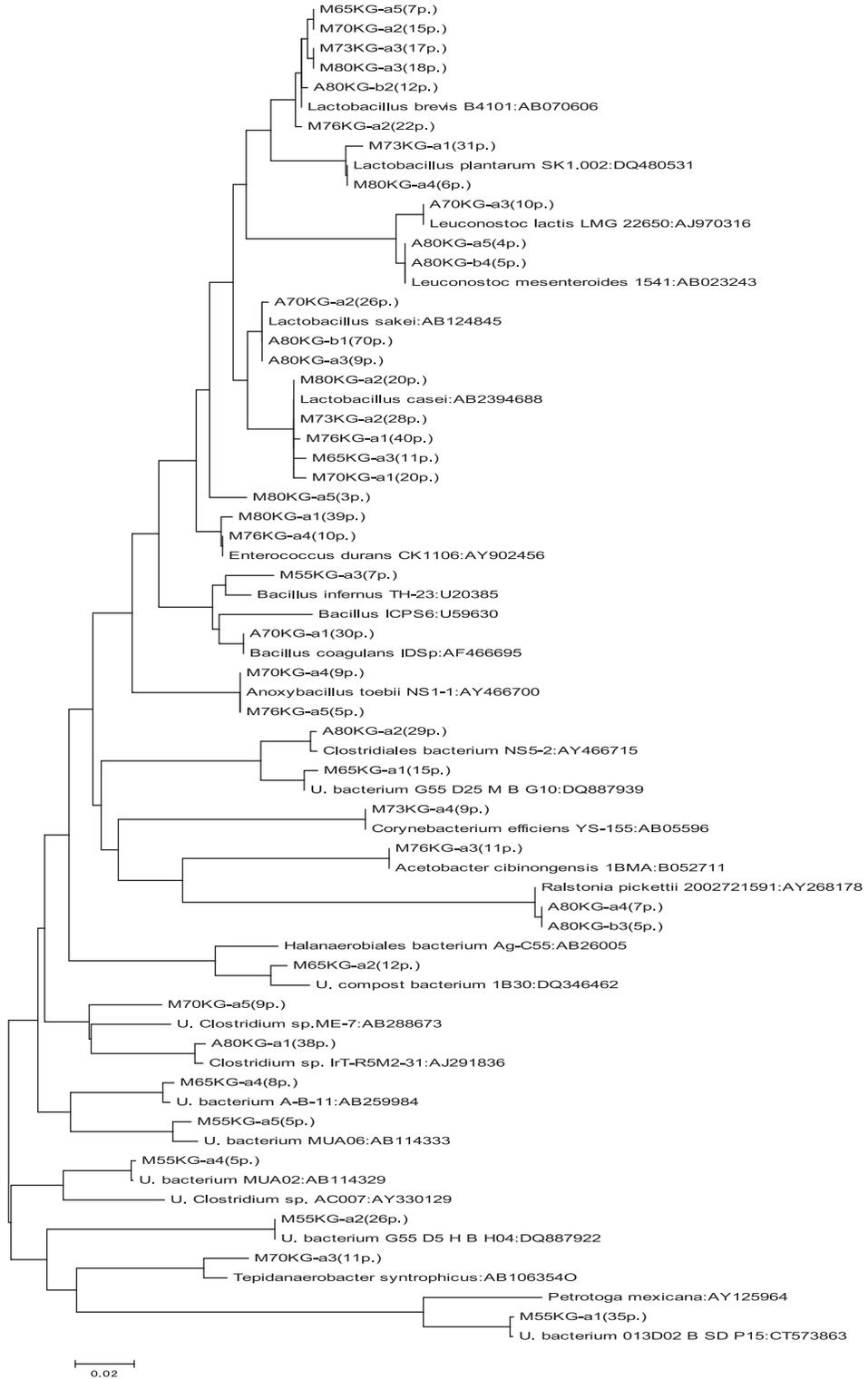


Fig.4 Microbial community in Experiment A (p. means detected ratios % of each OTU)

あり、70℃以下の場合、メタンガスの生成が見られたものの、73℃以上に上げると、メタンガスは生産されなかった。

実験B1において、酸発酵槽での炭水化物の可溶化はOLRが低いときに高かったのに対して、タンパク質の可溶化は、OLRが高いにもかかわらず実験B2で高かった。A70+M55の場合、運転が安定しており、統計的にもメタン転換率などについて有利であることが示された。

実験Aでの菌相解析を行ったところ、高温酸発酵槽では、*Bacillus coagulans*近縁種が90%、および*Lactobacillus sakei*近縁種が6%を占めていた。80℃の超高温酸発酵槽では、滞留時間が短くなったことによって*Clostridiales*から*Lactobacillus* spp.近縁種に群集が変化したと確認された。70℃の超高温酸発酵槽では、*Bacillus coagulans*の近縁種が30%と最も多くなり、温度を下げることで55℃の高温酸発酵槽に近い菌相となっていた。メタン発酵槽でも温度を高くすることにより菌相に変化が見られ、73℃、76℃、80℃での、主な微生物は*Lactobacillus*に属する微生物であった。

謝 辞

本研究の一部は、(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成金により行われました。深く感謝の意を表します。実験の遂行に際して、下水処理場関係各位、および大学院生の李名烈氏の協力に感謝いたします。

References

1. H. Tsuno: Report of CREST project, Development of Resources Recycling Type Urban Wastewater and Solid Waste Processing System, Japan Science and Technology Agency (2006)

(http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/report/sh_heisei12/shigen/tsuno.pdf)

2. H. Tsuno, H. Nagare, T. Hidaka: Journal of the Society of Instrument and Control Engineers, **45**, 10, pp.851-856 (2006)

3. F. Hong, H. Tsuno, T. Hidaka, J. Cheon: Environmental Engineering Research, **40**, pp.333-342 (2003)

4. F. Hong, H. Tsuno, T. Hidaka, J. Cheon: Journal of the Japan Society of Waste Management Experts, **15**, 5, pp.381-388 (2004)

5. Y. Park, F. Hong, J. Cheon, T. Hidaka, H. Tsuno: J. Biosci. Bioeng. **105**, 1, pp.48-54 (2008)

6. J. Tsubota, T. Tsubone, H. Tsuno: Journal of the Japan Society of Waste Management Experts, **18**, 2, pp.145-151 (2007)

7. J. Tsubota, H. Tsuno: Journal of Japan Sewage Works Association, **44**, 534, pp.122-130 (2007)

8. N. Tanigawa, T. Takemono, H. Ohki: Journal of Japan Waste Management Association, **50**, 217, 103-109 (1997)

9. J. Cheon, T. Hidaka, F. Hong, H. Koshikawa, D. Iwasaki, H. Tsuno: Environmental Engineering Research, **44**, pp.625-632 (2007)

10. D. Lane: Nucleic acid techniques in bacterial systematics. Stackebrandt E, Goodfellow M, editors. Chichester: Wiley, pp.115-175 (1991)

11. J. Cole, B. Chai, R. Farris, Q. Wang, S. Kulam, D. McGarrell, G. Garrity, J. Tiedje: Nucleic Acids Res., **33** (Database issue):D294-6 (2005)

12. K. Tamura, J. Dudley, M. Nei, S. Kumar: Mol. Biol. Evol. **24**, 1596-1599 (2007)

13. Y. Park, H. Tsuno, T. Hidaka, F. Hong, J. Cheon: Anaerobic Digestion, 10th World Congress, Montreal, Canada, Proceedings Volume 1, pp.515-521 (2004)

ガスハイドレートの基本物性と応用技術¹

楠田 啓²

Basic Properties and an Applied Technology on Gas Hydrate

Hiromu KUSUDA

Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Abstract

Gas hydrate are ice-like crystalline compounds in which hydrogen-bonded cages of water molecules trap small molecules like methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂) (Called guest molecule). It has been speculated that there are large oceanic methane hydrate deposits adjacent to Japan, and it is important to elucidate the mechanical and chemical properties of the hydrate to develop commercial technologies for identifications and extracting hydrate concentration to utilize these resources. We investigated mineral processing considering the protection of the environment and resources from the following various points of view. 1) Basic properties of gas hydrate. 2) Gas hydrate technology applied to biogas.

It is necessary to separate CH₄ from biogas (mixed gas including CH₄, CO₂, N₂, H₂S etc.) for effective utilization of biogas provided by methane fermentation as an energy source. We studied the formation / dissociation behavior of CH₄/CO₂ mixed hydrate to separate biogas using the characteristics of gas hydrate. The surface shape of the hydrate film was not uniform, and opaque CH₄ hydrate and transparent CO₂ hydrate seemed to coexist in a complicated manner. The transparent part became wider as the ratio of CO₂ increased. When the temperature increased, the hydrate film regenerated soon after the hydrate film was initially dissociated, and this occurred more often as the ratio of CO₂ increased.

Key Words: Methane Hydrate, CO₂ Hydrate, Guest Molecule, Gas Separation, Biogas

1. 緒 言

近年、次世代の天然ガス資源として、メタンハイドレートが大きな注目を集めている。このメタンハイドレートは、水分子とメタン分子からなる気体包接水和物(ガスハイドレート)で、低温・高圧状態で安定し、凍土地帯や大陸周辺部の海底の地下に存在している^{1,2}。日本周辺海域にも大量に存在することから、国産エネルギー資源としても大きな期待が寄せられている。また、大量に排出されるCO₂を地中や海底へ処分することが検討されており³、海洋処分を想定した場合、処分されたCO₂と海水の界面にはCO₂ハイドレートが生成し、CO₂の海水への溶出に大きな影響を及ぼすことが推察される。したがって、メタンハイドレートやCO₂ハ

イドレートの基本物性を詳細に知ることは極めて重要なことと位置付けられている。さらに、地球環境にやさしく、再生可能なバイオマスエネルギーの一つとしてメタン発酵によって得られるバイオガスがあげられるが⁴、これをエネルギー源として効率的に利用するには、バイオガスに含まれるメタンとそれ以外のガス(CO₂、N₂、H₂Sなど)を分離する必要がある。ここで、ガスハイドレートの特性を生かすことにより、副産物が発生しない全く新しいガス分離手法の可能性が考えられる。

ここでは、一般的に紹介されているガスハイドレートの基本物性を述べた後、当研究室で長年にわたって研究を続けてきた低温・高圧セルによるガスハイドレートの生成・分解挙動の観察結果から導かれるいくつかの特性を述べ、最後にハイドレート技術の応用分野の一つであるバイオガスを想定した混合ガスの分離への適用可能性について紹介していくことにする。

1.平成21年11月12日 本会第123回例会において発表

2.京都大学大学院エネルギー科学研究科

平成21年8月14日受理

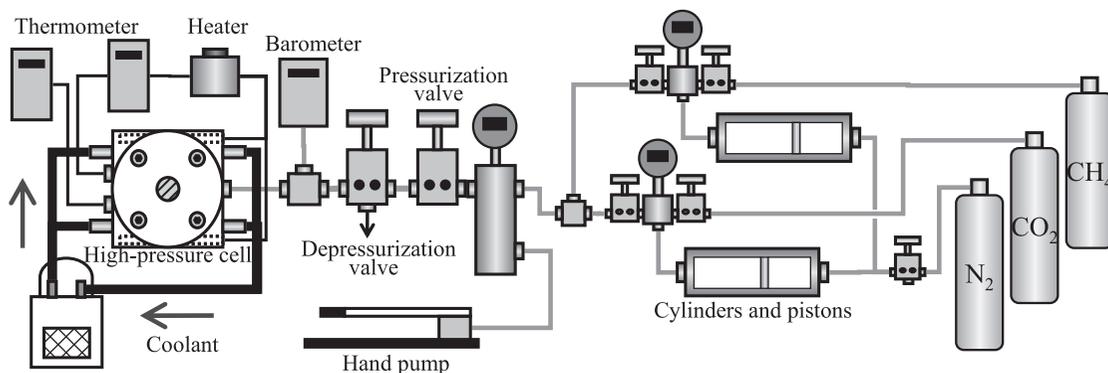


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

2 実験装置

一連の研究で使用している高圧セルは、最大耐圧は40 MPa、内容積0.3 mlで、直径8 mmのサファイアガラス製の窓を通してセル内部を観察する (Fig.1)。高圧配管には加圧用ハンドポンプと減圧バルブが接続されており、セル内の圧力を±0.1 MPaの精度で制御できる。またセル内への不凍液の循環とヒーターの制御によって、セル内の温度を調節することができる。今回の実験ではさらにガス混合装置を接続した。混合装置は高圧容器を並列に設置したもので、それぞれの高圧容器は最大耐圧が10 MPa、最大容量が106 mlであり、ピストンが内蔵されている。試料ガスボンベと高圧容器の間には調節バルブと排気バルブが取り付けられており、それぞれのガスの圧力を調節して混合比率を変えることができる。

3. ガスハイドレートの基本物性

3.1 ガスハイドレートの結晶構造

ガスハイドレートの結晶構造はタイプIとタイプIIが存在し、大きさの異なる2種類のケージ (籠状格子) が考えられている。タイプIの単位包の大きさは12 Åで、46個の水分子よりなり、タイプIIでは17 Åで、136個の水分子より構成されている。その中にタイプIでは8個、タイプIIでは24個の空隙を持ち、この空隙に相応した大きさの気体を取り込まれている。たとえば、タイプIの空隙にはメタンやCO₂が含まれるが、メタン (4.36 Å) がすべての空隙を満たすと、標準状態の200倍のメタンを含むことになる。通常は、空隙の一部はそのまま残されるので、170倍程度である。

3.2 ガスハイドレートの安定条件

種々のガスハイドレートの安定性に関する研究は、さまざまな温度・圧力のもとで水と気体を攪拌、反応させ、実験的に平衡関係を求める方法と、熱力学的な計算手法とによってすすめられている⁵。たとえば、メタン、水あるいは氷とハイドレートの相平衡曲線では、四相共存点 (水、氷、メタンハイドレート、メタンガス) は、0°Cでおおよそ2.6MPaで、海底260mの深さに相当する。また、10°Cでの三相共存点 (水、メタンハイドレート、メタンガス) は7.2MPaで、720mということになる。

3.3 ガスハイドレートの成長挙動 (CO₂ハイドレート)⁶

純水条件下におけるCO₂ハイドレートの成長過程の観察結果の一例をFig.2に示す。水とCO₂の界面においてCO₂ハイドレートが生成した後、界面に沿って膜状のCO₂ハイドレートが生成している様子が観察された。平衡条件からの離れ具合に応じて様々な表面粗

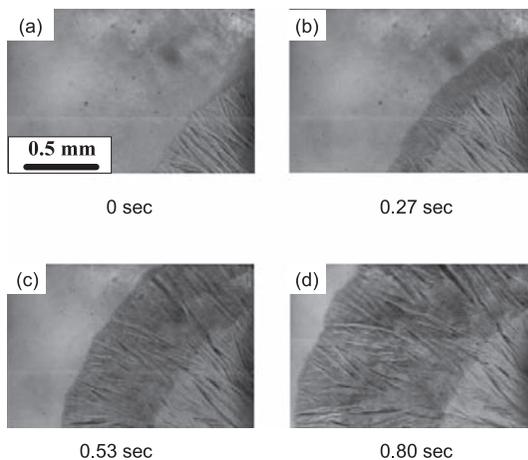


Fig.2 The CO₂ hydrate film at the vapor-liquid interfaces at 276.2 K and 2.5 MPa

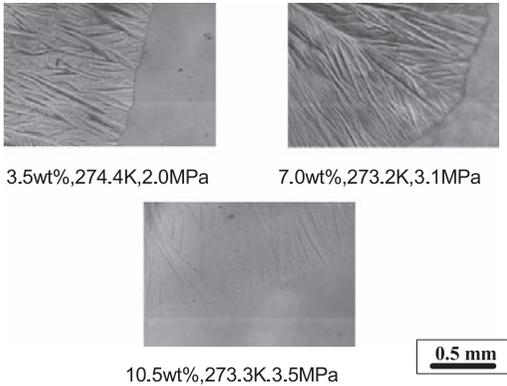


Fig.3 The CO₂ hydrate film formed at the vapor-liquid interfaces in NaCl aqueous solution.

さを持つ透明で薄い膜状のハイドレートが形成される様子が観察された。なお、気体CO₂条件下においても液体CO₂条件下においても本研究における条件下では膜の形状には大きな違いは見受けられなかった。

また、3.5wt%、7.0wt%、10.5wt%のNaCl水溶液条件下においても同様に成長過程の観察を行った。その結果観察されたハイドレート膜の例をFig.3に示す。溶液のNaCl濃度の変化によると考えられる膜形状の、大きな違いは見られなかった。しかしながら、NaCl濃度の高い水溶液においては、生成されるハイドレート膜が観察しにくくなる傾向がみられ、NaCl濃度が高いときほどハイドレート膜の厚さが薄くなっていることが推察された。この原因として、水溶液中のCO₂の溶解度が下がったことが考えられる。

様々な条件下における観察結果について成長速度と過冷却度の関係を調べた。その結果、ハイドレート膜の過冷却度に対する成長速度は、NaCl濃度が大きくなるほど小さくなっていく傾向がみられた (Fig.4)。

そこで、NaCl水溶液中における成長速度の律速の過程がNaClの排除の過程になっていると考え、それぞれの実験条件においてハイドレートが平衡となるNaCl濃度と元の溶液のNaCl濃度との差 ΔC と成長速度の関係を調べた。

その結果、ハイドレート膜の成長速度は、どの水溶液条件下においても濃度差が大きくなるにつれて大きくなる傾向にあることが分かった。さらに、NaClの排除の関係を律速として、簡単な成長モデルを考えると成長速度 V とハイドレート膜の厚さ δ について、以下のような関係が得られた。

$$V \cdot \delta = A \cdot \Delta C^{3/2}$$

(Aは水溶液やゲスト気体等の条件で決まる定数)

この関係よりハイドレート膜の厚さを計算した結果は、観察の結果によく一致することが分かった。このことからNaCl水溶液中では律速がNaClの排除の過程になっているものと推察される。

3.4 ガスハイドレートの生成頻度 (CO₂ハイドレート) ⁷

純水、海水とほぼ同等の濃度である3.5wt%、その倍の濃度の7.0wt%を液相として用い、過冷却度 ΔT を1.0K、2.0K、3.0K、4.0Kに設定し、それぞれに対応した圧力条件で温度条件275.2Kのもと、ハイドレート生成を行った。各条件下で20回の試行を行い、過冷却度、もしくはNaCl濃度を変化させ、生成時間と生成頻度を比較する事でハイドレート生成における過冷却度とNaClのインヒビターとしての効果を調べた。

まずNaCl濃度を揃えた上で過冷却度の変化に対する比較を行った。この時、NaCl濃度に関わらず過冷却度が大きくなる程生成時間は短くなり、生成頻度が高くなる傾向が見られた。これは結晶の臨界半径は過冷却度に反比例するため、過冷却度の上昇に伴い臨界半径が小さくなったためと考えられる。

次に過冷却度を揃えた上でNaCl濃度の変化に対する比較を行った。どの過冷却度においてもNaCl濃度の変化に対して生成頻度の変化は見られなかった。つまりハイドレートの結晶生成においてインヒビターの効果はほとんど認められなかった。

4. ガスハイドレートの応用技術⁸

4.1 混合ガスハイドレートの生成挙動

メタン発酵によって得られるバイオガスを想定し、CH₄:CO₂の圧力比をそれぞれ8:2、6:4、5:5、4:6、2:8に調整した混合ガスを用い、気液界面に生成するハイドレート膜の生成挙動を観察した。

生成時に気泡がハイドレート膜の成長方向に移動するなど、これ

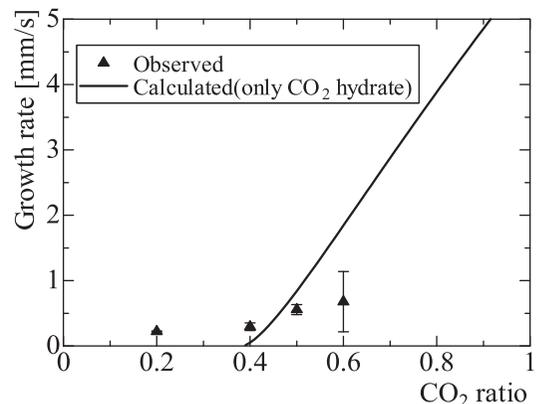


Fig.4 Growth rate of mixed hydrate (277.2 K, 5.4 MPa)

まで観察してきたCH₄ハイドレートやCO₂ハイドレートと同様の現象も見られた、しかし、生成したハイドレート膜の表面形状は一様ではなく、不透明なCH₄ハイドレートと透明なCO₂ハイドレートが複雑に混在し、CO₂の割合が高くなるほど透明な部分が広く観察されるようになった。またCO₂の混合割合が80%の場合には、先に透明なCO₂ハイドレート膜が生成し、不透明なCH₄ハイドレート膜が後から浮き出てくるように生成する状況が観察された。

次に混合ガスハイドレート膜が生成するときの成長速度を測定すると、CO₂の割合が高くなるほどハイドレート膜の成長速度も速くなり、CO₂の割合が特に高い領域(CH₄:CO₂=2:8)では、CO₂のみによってハイドレートが生成すると仮定した場合の成長速度とよく一致した(Fig. 4)。

4.2 混合ガスハイドレートの分解挙動

ハイドレート膜が生成してから数分放置して状態を安定させた後、昇温試験と減圧試験を行い、ハイドレート膜の分解挙動を観察した。昇温試験では、混合ガスハイドレート膜が部分的にいったん分解した後、すぐに同じ部分に再びハイドレート膜が生成する様子などが観察された。この分解後の再生成は、混合ガス中のCO₂の割合が高いときにしばしば観察された。

それぞれの組成における混合ガスハイドレートの分解条件を示すとFig.4のようになる。なお再生成が起こった場合は、分解後の再生成が観察されなくなった時点の温度、圧力を分解条件とした。いずれの点もCH₄ハイドレートとCO₂ハイドレートの2本の平衡曲線の間に存在し、混合ガス中のCO₂の割合が高くなるほど分解条件もCO₂ハイドレートの平衡曲線に近くなる事が分かる。

この実験結果より混合ガスハイドレートの分解条件がCH₄/CO₂の割合に依存すると考え、CH₄、CO₂それぞれの単体ハイドレート

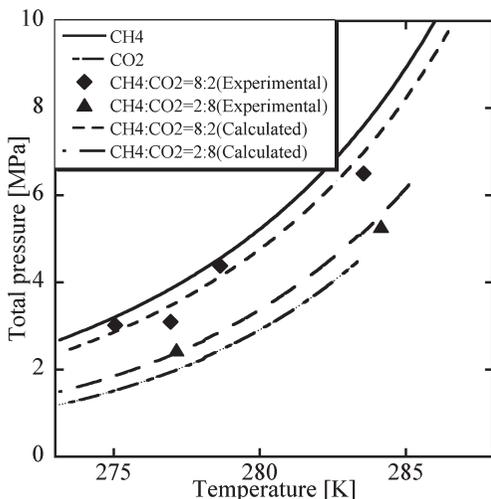


Fig.5 Equilibrium curves of CH₄, CO₂, and mixed hydrate

の既知の分解条件を、混合割合で重み付けし、その和を混合ガスハイドレートの分解条件とするモデル式を作成した。

$$p = p_{CH_4} x_{CH_4}^g + p_{CO_2} x_{CO_2}^g$$

ただし、 p は混合ガスハイドレートの分解圧力、 p_i は気体*i*の単体ハイドレートの分解圧力、 x_i^g は気体*i*のモル分率である。

このモデル式より得られた分解条件を実験で得られたものと重ね合わせると、Fig.4のように各比率での混合ガスハイドレートにおいて非常によく一致することがわかった。

ガスハイドレートの特性をバイオガスの分離に適用するためには、さらにH₂SやN₂など含む混合ガスについても実験を重ね、混合ガスハイドレートの生成・分解機構を詳細に解明していく必要がある。

5. 結 言

これまで述べてきたように、ガスハイドレートは、次世代の天然ガス資源として大きく期待されているメタンハイドレート以外にも、さまざまな特性を持つことが明らかになってきている。しかしながら、まだまだ未知の部分も数多く残されており、資源分野以外にも、環境対策、ガス精製など種々の応用分野が期待される。

References

1. Mikio Sato: Gekkan-Chikyuu, 16-9, pp. 533-538 (1994)
2. Takashi Nishiyama, Hiromu Kusuda: Energy and Resources, **22**, No.2, pp.152-156 (2001)
3. Kazuaki Ohgaki, Takuya Matsubara, Shinya Nakano: Gekkan-Chikyuu, 18-10, pp.685-689 (1996)
4. Sloan E. D. : Clathrate Hydrates of Natural Gases, Marcel Dekker, Inc, 641p (1990)
5. Tatsuya Noike: Methane Fermentation, Giho-do, 283p. (2009)
6. Hiroyoshi Kimura, Kentaro Hayashi, Youqing Chen, Hiromu Kusuda, and Mamoru Mabuchi: Proceedings of MMIJ (Autumn), pp.144-145 (2008)
7. Masayuki Shibuya, Hiroyoshi Kimura, Youqing Chen, Eishi Kusaka, Hiromu Kusuda and Mamoru Mabuchi, Proceedings of MMIJ, (2009)
8. Ken Nakanishi, Akinori Kitagawa, Hironori Kimura, Youqing Chen, Eishi Kusaka, Hiromu Kusuda and Mamoru Mabuchi: Proceeding of 4th international Symposium on Material Cycling Engineering, pp.53-54 (2009)

地熱エネルギー開発の現状と将来展望¹

江原幸雄²・西島 潤²

Present Status of Geothermal Energy Development in Japan and Its New Perspectives

Sachio EHARA and Jun NISHIJIMA

Laboratory of Geothermics, Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University

Abstract

Geothermal energy is renewable and its sustainable production is possible based on scientific monitoring and modeling of geothermal reservoir. We have a large amount of geothermal resource potentials, that is, amounting to larger than 20,000MWe in Japan. More than 530MWe of geothermal power generation capacity at eighteen sites have been installed in Japan until 1999. However, change in governmental promotion policy of geothermal energy and low cost of oil retarded geothermal development in Japan after that. Recently several new actions such as discussions between geothermal and governmental peoples, cooperative works with other renewable energy groups etc. are changing the situation and now we hope that we will have new geothermal power stations in the near future. Geothermal heat pump systems for air conditioning are also spreading quickly very recently.

Key words: Geothermal energy, Power generation, Direct use, Geothermal heat pump, Geothermal reservoir, Sustainability

1. はじめに

地球の体積の99%は1000°C以上、そして、100°C以下はわずか0.1%と言われている¹。従って、地球はまさに火の玉である。また、地球の中心温度は6000°Cと言われている。この値は偶然であるが、太陽の表面温度にほぼ等しい。このように、地球の内部は高温で、地表は、たとえば日本列島では、10-15°C程度の低温である。従って、地球内部から地表に向かって、常に熱が流れている。この熱の流れのことを地殻熱流量と呼ぶが、地球全体の地殻熱流量の平均値はおおよそ60mW/m²であり、この割合で、地球から熱が流出し続けても10億年以上かかる。すなわち、地球の中には膨大な熱が蓄えられている。そのほんの一部を地上に取り出し、人間生活に利用するというのが地熱エネルギーの利用である。

2. 多様な地熱エネルギーの利用法

地球の半径は約6470kmであり、そこが如何に高温であっても、人類は到達することが不可能で、従って、その熱を利用

することはできない。われわれが利用できるのは、当面ごく表層の地下数km以浅である。ここにどのような地熱エネルギーが蓄えられているか。地熱エネルギーの分類は、いろいろな観点からなされるが、温度によって分類するのがわかりやすい。たとえば、超高温（おおよそ400°C以上）、高温（150-350°C程度）、中低温（数10-150°C程度）、そして、常温（10-20°C程度）である。

超高温地熱エネルギーは、火山の下にあるマグマ（岩石の溶融体）およびその周辺のマグマによって温められた高温の岩石が相当する。このマグマからの熱エネルギーは究極の地熱エネルギーであるが未だ利用された例はなく、基礎的研究の段階にあり、ハワイにあるキラウエア火山の溶岩湖でボーリング掘削を行い、注入した水を加熱・蒸気化して回収するという実験が行われたに過ぎない。また、直径2kmの溶融マグマから電気として熱エネルギーを取り出した場合、100万kWの発電を30年間行えるという計算がある。しかし、いずれにしても、未来エネルギーである²。

高温地熱エネルギーは地熱発電として利用することができる。火山地域周辺に降った雨は地下に浸透し、マグマによって温められた岩石により加熱され、浮力を獲得後、上昇し、地下1-3km深の地熱貯留層に蓄えられる。この地熱貯留層は多くの場合、ヤカンのような3次元の広がりを持っている

1. 平成21年11月12日 本会第123回例会において発表

2. 九州大学工学研究院地球資源システム工学部門

平成21年7月24日受理

というより、水を吸った量のように2次的に薄く広がっている。地下の地層の食い違い、すなわち断層がそれに相当していることが多い。地層の境界面が地熱貯留層になっている場合もある。この地熱貯留層は熱水、熱水と蒸気の気液2相あるいは蒸気で満たされており、この地熱貯留層に向かって地表からボーリングし、蒸気を取り出して、タービンを回し、発電するのである。地熱貯留層は高圧のため液相であることが多く、ボーリングによって地上では蒸気と熱水が得られる。そして、蒸気はタービンに送られるが、熱水は還元井によって地下に戻される（熱水卓越型地熱発電の場合）。熱水を地下へ還元する理由は、それにより、貯留層の圧力を維持し、安定発電を継続するとともに、熱水に含まれるヒ素などの有害成分を環境中に排出しないためである。地熱貯留層が気液2相あるいは蒸気の場合には、地上で得られるのは蒸気単相であり、還元井の必要はなく、従ってコスト的にも安い（蒸気卓越型地熱発電の場合）。

中低温地熱エネルギーは温度の低い地熱貯留層から得られる。火山の近くにある場合もあれば、火山地域でなくとも、深く掘れば埋暖かい熱水が得られる。多くの場合、この熱水を熱として利用する。従って、熱の直接利用とも言われる。木材を乾燥させたり、温室に使ったり、温泉に使ったり、そして、道路融雪に使われることもある。高温から低温まで、各種利用を組み合わせる、多段階利用、すなわちカスケード利用が行われることもある。なお、アンモニア等の低沸点媒体を熱水で加熱し、蒸気をつくり、これによってタービンを回すという、バイナリー発電も近年行われるようになってきた。常温の地熱エネルギー利用は地中熱利用とも呼ばれる。常温のものが熱利用されるとはやや不思議であるがこういうことである。日本のように中緯度地帯では気温の年変化は深さ15m以深には及ばず年中ほぼ一定である。たとえば、地下50mでは18℃程度である。一方、気温は夏に高く（28℃程度）、冬に低い（8℃程度）。この地中と大気との温度差を利用して、冬には暖房を、夏には冷房を行う。しかし、そのままでは、冷暖房に十分な温度が得られないので、ヒートポンプという熱交換装置を用い、必要な温度を得ているのである。この地中熱利用システムは大地熱源を利用したヒートポンプシステムと呼ばれることもある。

さて、上述のように、地熱エネルギーは多様な利用法が考えられるが、以下では、主として地熱発電について述べることにする。

3. わが国の地熱発電開発の現状

地熱発電は1904年イタリアのラルデレロで始まった。わが国では、1925年別府で行われた1.12kWの試験発電が最初のものである。わが国最初の商業用の地熱発電は1966年岩手県松川地熱発電所で開始された。当初は出力9,500kWであったが、現在は23,500kWに増設されている。すでに、40年以上が経過しているが現在でも安定した発電を継続している。なお、この地熱発電所は蒸気卓越型である。一方、わが国最初の熱水卓越型地熱発電所は、1967年大分県大岳地熱発電所で運転開始された。現在の出力は12,500kWである。こちらの地熱発電所も運転開始以来、安定した発電を続けている。上記2つの地熱発電所が運転開始されて以来、主として九州および東北地方で地熱発電所が建設され、1999年には18ヶ所、総設備出力合計53万kWを超え、世界5位の規模となった。

しかし、その後、地熱エネルギーが「新エネルギー」の枠からはずれ、国からの支援策が減少するとともに、さらに、電力の自由化がなされ、化石燃料発電と同じ土俵でコスト競争をしなければならず、地熱発電の有利さが失われ、2000年以降、新たな地熱発電所の建設は行われてこなかった。このような中で、日本地熱学会や日本地熱開発企業協議会等による国への働きかけ、他の自然エネルギー団体と協力してその重要性を市民に訴えたり、マスコミへのアウトリーチ活動を強める中で、地熱エネルギーへの理解が深められてきた。このような中で、2008年12月、経済産業省・資源エネルギー庁の中に、「地熱発電に関する研究会」が組織され、地熱発電促進を阻害する要因の分析、および今後の地熱発電の見通し等が議論され、2009年5月に開催された最終委員会では、2020年には現在の3倍程度の発電が可能（総設備出力約166万kW）という見通しを提示するまでになった。現在、地熱発電所の建設を目指した調査が実施されている地点が複数あり、順調に進行すれば、今年度中に、新しい地熱発電所建設へ向けた動きが始まり、数年以内には新たな地熱発電所が運転開始になることが期待されている。

4. 地熱発電の優位性と弱点

- 他の再生可能エネルギーと比較して -

さて、1999年以降、空白の10年間を過ごした地熱発電であるが、上述のように新たな展開が図られつつある。地熱発

電はクリーンな再生可能エネルギーとして、地球温暖化対策にも有効なものと理解されているが、ここでは、地熱発電の特徴を他の自然エネルギーと比較しながら見ることにする。

地熱発電は、他の再生可能エネルギーの場合と同様に、発電に伴って排出されるCO₂が化石燃料に比べて少ないというのがまずあげられる。単位発電量あたりのCO₂排出量は水力発電について低くなっている。また、他の再生可能エネルギーと比較した場合、地熱発電の大きな利点として取り上げられるのは、天候に左右されず、1日24時間発電が可能というその安定性である。実は、わが国の地熱発電の設備容量は太陽光発電や風力発電より小さいのであるが、たとえば1年間あたりの実際の発電量は、地熱発電が1番大きいのである。このことは、案外知られていない事実と思われるが、その理由は、地熱発電はその利用率が約70%であるのに対し、風力発電では20%程度、太陽光発電では12%程度であることによる³。すなわち、地熱発電は安定して発電が行え、また、CO₂排出量が極めて少ないのが大きな利点である。

このように地熱発電は、上述したように年間にわたる発電では極めて安定している。しかしながら、松川地熱発電所や大岳地熱発電所のようにすでに40年以上にわたって安定して発電を行ってきているが、さらに、数10年間から300年程度にわたるような長期間の安定した発電、すなわち「持続可能な発電」が可能かどうかという点になると、太陽光発電や風力発電では自明で問題とならないが、地熱発電の場合は自明とは言えず、技術的な対応が必要となる。太陽光発電や風力発電では、エネルギーの取り過ぎによる、発電量低下は起こりえないが、地熱発電の場合、過剰な生産を行えば、持続可能な発電は行えなくなってしまうことがあり得るのである。すなわち、各地熱地域には固有の適正な発電量があり、これより大きな発電を行えば、短期的には、それを実現できても、長期的には発電量が低下し、場合によっては、発電が継続できない場合もありうるのである。一方、適正規模より小さい発電を行えば、持続可能な発電は実現されるが、資源の一部しか利用されず、多くの場合、経済性に問題が生じる。従って、それぞれの地域において、開発のより早い段階で、如何に適正な発電規模を見出すかが問題となる。この適正な規模を見出すためには、発電に伴う地熱貯留層の変化を科学的に把握することが必要となる。以下では、地熱発電の持続可能性に関して、大分県八丁原地熱発電所での例を挙げて説明することにする。

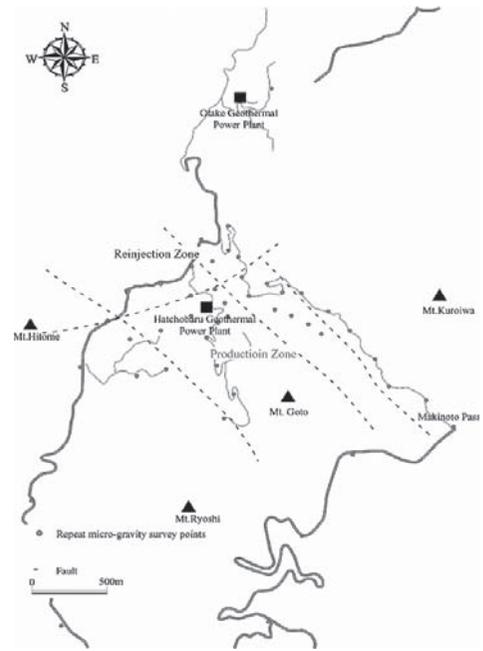


Fig.1 Location map of repeat gravity measurement stations at Hatchobaru geothermal field in the southwestern part of Oita Prefecture, Japan. Small solid circles show gravity stations. The solid square shows the location of the geothermal power plant. Broken lines show main fracture zones. Solid triangles show volcanoes of the Kuju volcano group. The reinjection and the production zones are in the northwestern and the southeastern parts, respectively

5. 持続可能な地熱発電の実現

発電に伴って、地熱貯留層から蒸気と熱水が生産され、熱水は地下に還元され、やがて、その一部は地熱貯留層へと戻っていく。一方、発電に使われた蒸気の大部分は、大気中に放出される。その蒸気はやがて雲となり、雨となって再び地上に落ち、地下に涵養されるわけであるが、もともとの地熱貯留層に戻ってくる可能性は低いであろう。すなわち、もともとあった地熱貯留層中の蒸気・熱水は次第に減っていく（言い換えると地熱貯留層の圧力が減ってくる）。しかしながら、自然はうまくできていて、地熱貯留層の圧力が減少すると、地熱貯留層の圧力とその周囲の圧力との差（厳密に言えば、圧力勾配）に従って、周囲から、自然に流体が補給されるのである。この自然の補給と大気中に失われる蒸気量と

がバランスしていれば、地熱貯留層内の流体質量に変化がなく、安定した地熱発電が実現されることになる。このような質量変化をどのように補償することができるのであろうか。実は、貯留層の地上部分で重力の変化を測定し、その変化を追跡することによって、それを実現できるのである。重力変動観測法と言う方法がそれである。

八丁原地熱発電所は1977年に1号機(設備出力55,000kW)が運転開始し、1990年に、2号機(設備出力55,000kW)が設置された。1977年当初、認可出力23,000kWでスタートし、1980年に認可出力55,000kWとなった。1990年に2号機の出力は55,000kWが認可され、総出力11万kWのわが国最大の地熱発電所となった。九州大学地球熱システム学研究室では、2号機運転開始直前から、重力変動観測(精密重力計を用いて、地上観測地点での重力値の経時変化を追跡する)を行うことによって、地熱貯留層内の流体質量変化をモニタリングしてきた⁴。Fig.1に重力観測点の位置を示した。地熱発電所の建物は図中のほぼ中央にあり、その南東側が生産ゾーン(深さ、おおよそ1000-2500m)、その北西側が還元ゾーン(深さ、おおよそ1000-1500m)となっている。

Fig.2に地熱流体生産ゾーンにおける重力変化を、Fig.3に還元ゾーンにおける重力変化の例を示した。生産ゾーンにおける重力は2号機の運転開始と共に、急激に低下し、1992年には約150マイクロガルの減少となった(なお、測定精度は10マイクロガル程度である)。その後一時回復したが再び低下し、1997年頃から、重力値が安定してきた。重力値が大きく低下した1993年頃には、最大出力は8万kW程度までに低下した。実はこのような重力変化は地熱貯留層の圧力変化と非常によく対応している。また、発電出力の変化とも見事に対応している。すなわち、重力の低下時には発電出力も減少し、重力が増加すると発電出力も回復する。1999年以降、発

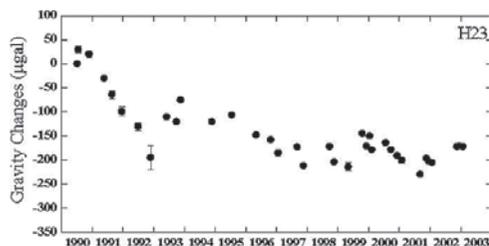


Fig.2 Gravity change at the station H23 in the production zone after the commencement of power generation in the Hatchobaru geothermal field

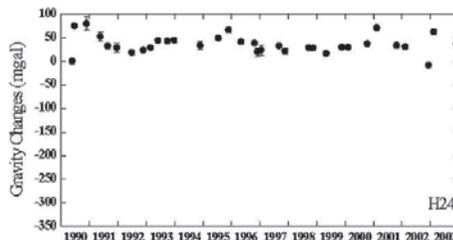


Fig.3 Gravity change at the station H24 in the reinjection zone

電出力は安定している。すなわち、重力変化は地熱貯留層内の状態(質量変化あるいは圧力変化)をよく反映していると言える。

一方、Fig.3の還元ゾーンの重力変化は生産ゾーンとは全く異なっている。還元が開始されると重力値は急激に増加したが、やがて減少し、その後、比較的安定した値を保持している。これは、還元開始直後、還元熱水が一時的に還元井周辺に滞留したが、その後は徐々に拡散し、還元井周辺に留まることなく、地熱貯留層等へ流出したものと理解された。

Fig.4およびFig.5には重力変化の空間的分布を示した。Fig.4は1990年から1992年間の変化で、Fig.5は2000年から2001年間の変化である。これを見ると2号機運転開始直後では生産ゾーンを含む広い範囲で重力が減少していることがわかる。一方、2001年から2002年では、広範囲の重力低下は

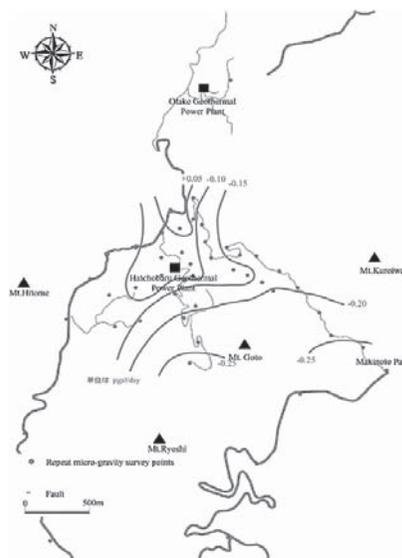


Fig.4 Change in gravity from June 1990 to June 1992 at the Hatchobaru geothermal field. (Unit : microgal/day)

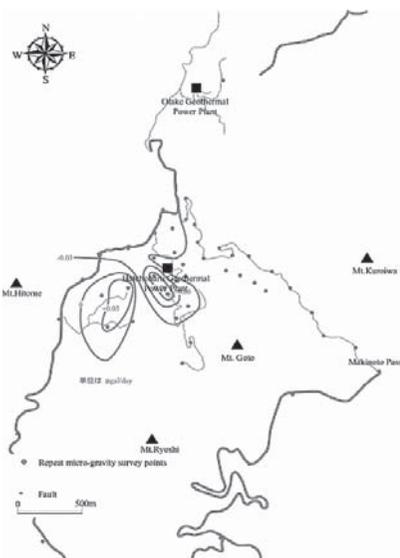


Fig.5 Change in gravity from October 2000 to October 2001
(Unit : microgal /day)

消滅し、生産ゾーンに小規模の重力低下および増加域が形成されているのみである。さて、このような重力変化図にガウスの定理を適用することにより、重力変化を引き起こした、地下における質量変化を見積もることができる。その結果を示したのが、Fig.6 および Fig.7 である。Fig.6 は 1991 年 8 月から 1993 年 5 月の間の質量収支、Fig.7 は 1999 年 10 月から 2000 年 10 月までの質量収支を示した。たとえば、Fig.7 から以下のようなことが読み取れる。この 1 年間で、22.7 メガトンの地熱流体が生産され、14.4 メガトンの熱水が還元された。その結果として、 $22.7 - 14.4 = 8.3$ メガトンの流体（水）が消失したことになる。しかしながら、重力観測結果にガウスの定理を適用して求めた質量欠損量はわずか 1.0 メガトンであった。このことは、 $8.3 - 1.0 = 7.3$ メガトンの流体が周囲から補給されたことによる。この場合は、還元熱水はすべて地熱貯留層に回帰したと仮定して計算をしているので、補給量の下限を示している。これらの数値を地熱貯留層の数値モデリングの結果⁵と比較すると、おおよそ 75%の還元水が地熱貯留層に回帰したと考えると、観測結果と数値モデルの結果とは一致する。さらに、数値モデリングから、生産地熱流体量のうち、自然涵養が 46%を占め、還元熱水の割合が 48%と見積もられた。すなわち、生産流体の 94%が地熱貯留層に補償されている。これらの数値の精度から言えば、ほぼ生産

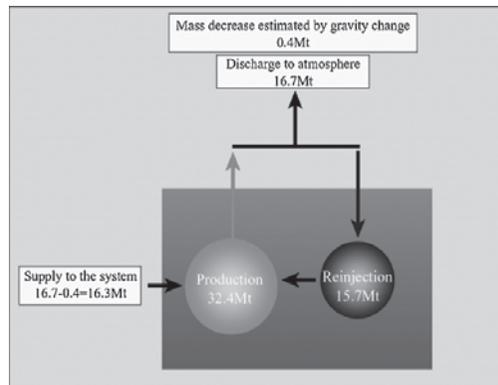


Fig.6 Mass balance from August 1991 to May 1993

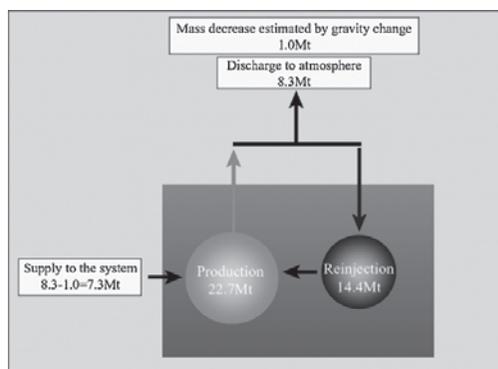


Fig. 7 Mass balance from October 1999 to October 2000

量に見合った補給がなされていると言える。従って、八丁原地熱発電所地域では持続可能な地熱発電が実現されていると言える。すなわち、モニタリングとモデリングという科学的な手法によって、持続可能な地熱発電を実現するための地熱貯留層の科学的管理が可能であることを示している。

6. おわりに

- 我が国の地熱利用の新しい展開に向けて -

地熱発電は発電に伴う CO₂排出が少なく、かつ 24 時間安定した発電が可能である。また、適切な地熱貯留層の管理により、長期間にわたる安定した発電すなわち、持続可能な発電が可能であることを示した。従って、低炭素社会を目指す上で、有効な発電方法であると言える。現在、地熱発電がわが国の総発電量に占める割合は 0.3%に過ぎない（ただし、この値でも太陽光発電よりはるかに多いのであるが）。しかし、最近、自然エネルギー団体が連携して、2050 年における、自然エネルギーの供給可能ポテンシャルを評価したが、その結

果、自然エネルギー全体で、総電力需要量の67%をまかなうことが可能であることを示した。そして、地熱発電は総電力需要量の10.2%をまかなうことができることを示した⁶。すなわち、わが国には十分な自然エネルギーそして地熱エネルギーが存在しているのである。問題は国民的合意の下で、どのようにこれを実現していくかということである。地熱発電では、有望な資源量の多くが国立公園内にあるという問題もある。また、有望な地熱発電地域の周辺には温泉地があり、地熱発電により温泉が影響を受けるのではないかとの懸念から、地熱発電のための調査すらできない場合もある。わが国はアメリカ、インドネシアについて世界第3位の地熱ポテンシャルがある⁷。上述の困難を乗り越える努力がなされ、さらに、国による適切な支援策があれば、地熱エネルギーは低炭素社会構築に重要な貢献ができると考えている。

References

1. L. Rybach and M. Mongillo: GRC Transactions, **30**, pp. 1083-1090 (2006)
2. S. Ehara: Kazan no Netsushisutemu, Touka Shobo, pp.1-200 (2007)
3. Chinetsuhatsuden Kenkyuukai: Chinetsu Hatsuden Kenkyuukai Houkokusho, pp.1-50 (2008)
4. S. Ehara: Jour. Japan Institute of Energy, **87**, pp.792-800 (2008)
5. H. Tokita, E. M.Rima, R. Itoi, M. Akiyoshi and T. Senju : Proc. Renewable Energy Conference 2006, pp.1549-1552 (2006)
6. S. Ehara, M. Adachi, H. Muraoka, K. Yasukawa, I. Matsunaga and T. Noda, Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan, **30**, pp.165-179 (2008)
7. H. Muraoka: Jour. Japan Institute of Energy, **86**, pp.153-160 (2007)

タワーミルにおける運転動力低減対策¹

新田 幸人²・古山 隆³

Measures for Power Draw Reduction on Tower Mill

Sachihito NITTA and Takashi FURUYAMA

Nippon Eirich Co., Ltd.,

Department of Earth Resources Engineering, Kyushu University

Abstract

On-going operation data of Tower Mills were collected. The particle size distribution ground with Tower Mill was then predicted by analyzing the data using Grinding Kinetics Theory. The material is supplied to hydro-cyclone separators to obtain finished particles. The particle size distribution is also simulated using an expression of hydro-cyclone classification. Results based on the theory and expression provides sufficient and proper mass-balance of the Tower Mill grinding circuit. From the mass-balance, proper motor sizes for Tower Mill and the auxiliary equipments, such as pumps, are obtained. The proper motor size reduces power draw effectively on the Tower Mill circuit.

Key words: Tower mill, Comminution, Classification, Power draw reduction

1. 緒 言

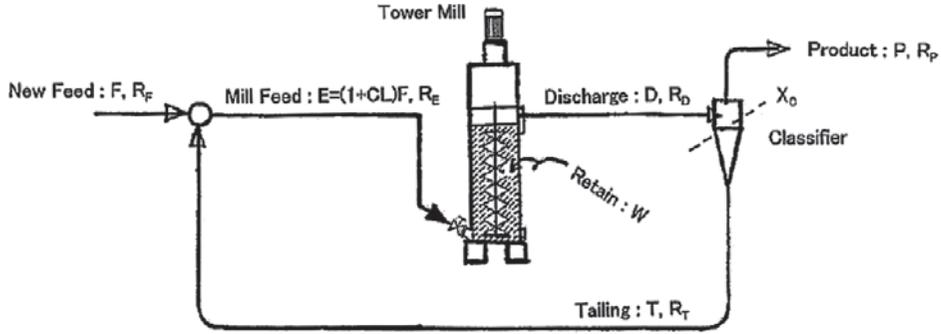
鉱物処理やリサイクルなどの資源化プロセスは単体分離(破碎・粉砕)、分級、分離・選別、精製・高純度化といった単位操作で構成されているが、その中で粉砕は非常に効率の悪い単位操作であると言われており、セメント工業では電力の60%、選鉱工場では電力の70%が粉砕によって消費されている¹。このように鉱物処理やリサイクルの工場などでは単体分離に費やす電力を低減化することが省エネルギー化を図るための第一歩であると言える。しかしながら、粉砕機の製造についての明確な設計指針がほとんどなく、小型のテスト機で得られたデータと経験(例えば、安全のために算出された動力をさらに2倍にするなど)を元に設計・製造されている場合が多い。著者らはこれまでに媒体攪拌式立型ボールミルであるタワーミルの設計指針に関する研究を行ってきた^{2,3}。本論では運転動力の低減対策として適切なモーターサイズを選定するための動力の予測方法と分級性能の向上による動力原単位の低減化について報告する。

2. タワーミルの概要

タワーミルは日本人の発明による媒体攪拌型微粉砕機の一つであり、昭和28年(1953)に銅鉱石を微粉砕する必要に迫られていた日室鉱業(株)(現在(株)ニッチツ)の土倉鉱業所に導入されたのを皮切りに、各種金属鉱山の選鉱場において再摩砕用粉砕機として利用されてきた⁴。タワーミルの特徴には電力消費量がボールミルに比べ60%程度と低い、騒音・振動が小さい、これにより基礎工事や防音建屋等の付帯設備が安く上がる、保守修繕費が安い等がある。現在、稼動中の最大ミルは1500馬力のモーターを搭載した石灰石粉砕能力65t/hのミルで排煙脱硫用として運転中である。

Fig.1に粉砕機(Tower Mill)と分級機(Classifier)を組み込んだ典型的な閉回路粉砕系(Typical Closed Circuit)を示す。この系において粉砕原料(F: Feed)はRFなる粒度分布を持ち、RTなる分布を持つ分級粗粒(T: Tailings)と共にミルへ供給(E: Entry)される。ミル供給粒子(E)の分布はRFとRTから合成されREとなり、ミルの粉砕ゾーン(H: Hold-up)を通過し排出され(D: Discharge)、RDなる分布になる。ミル排出粒子(D)は分級機において分離径 X_c で粗粒部(T)と微粒部(P)に理想的に完全に分離され、RPなる分布を持つ製品(P: Product)として系外へ取り出される。

1. 平成21年11月12日 本会第123回例会において発表
2. 日本アイリッヒ(株)
3. 九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門
平成21年9月3日受理



F : New Feed **R_F** : New Feed Particle Size Distribution **T** : Tailing **R_T** : Tailing Particle Size Distribution
E : Mill Supply **R_E** : Mill Feed Particle Size Distribution **P** : Product **R_P** : Product Particle Size Distribution
D : Mill Discharge **R_D** : Discharge Particle Size Distribution **W** : Retain inside Mill **τ** : Retention time (Plug Flow)
CL : Circulating Load **X_C** : Parting Size

Fig.1 Typical closed circuit of Tower Mill

3. 一般的なモーターの性能

メーカーが 420 kW のモーターを販売する際に添付する性能曲線を Fig.2 に示す。横軸はボールを充填した際の負荷割合 (%) を表し、右側の縦軸は力率 (%) とモーター効率 (%) を、左側の縦軸はモーターにかかる電流 (A) を表す。負荷割合が高い場合は電流が大きくなり、力率も大きく、モーター効率も良くなる。例えば、負荷割合が 100 % の時、電流は 99 A であり、力率は 86 %、モーター効率は 95 % となる。しかし、例えば負荷割合が 40 % と小さくなると力率が急減に減少し、無効電力が増大してしまう。このことから、無効電力を極力抑えるためには大きな負荷割合で運転できるようにモーターを選定することが重要となる。

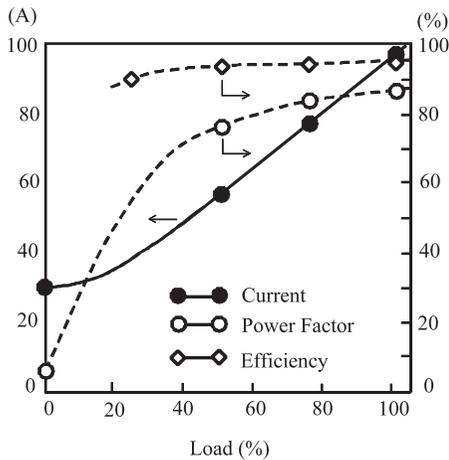


Fig.2 420kW motor performance curves

4. 次元解析によるタワーミルの動力予測

4.1 タワーミルの動力に影響する要素と次元式

今回の解析に用いたタワーミルの概念と各要素及びその単位をFig.3 に示す。基本の変数式を次のようにする。

$$P \propto A^\alpha \cdot S^\beta \cdot H^\gamma \cdot B^\delta \cdot N^\epsilon \cdot D^\phi \cdot \rho^\theta \cdot \mu^\lambda \cdot g^\kappa \quad (1)$$

Fig.3に示す各要素と単位から(1)式を次元方程式に置き換える。

$$\begin{aligned}
 [\text{ML}^2\text{T}^{-3}] &= k \cdot [\text{L}]^\alpha [\text{L}]^\beta [\text{L}]^\gamma [\text{L}]^\delta [\text{T}]^\epsilon [\text{L}]^\phi \\
 &[\text{ML}^{-3}]^\theta [\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}]^\lambda [\text{L}\text{T}^{-2}]^\kappa
 \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式の左右両辺は同次元との前提から (1) 式は次のようになる。

$$P = k \cdot A^\alpha S^{\beta(5-2\lambda) - (\alpha + \gamma + \delta + \psi + \kappa)} H^\gamma B^\delta N^{3 - \lambda - 2\kappa} D^\phi \rho^{(1-\lambda)\lambda} \mu^\lambda g^\kappa$$

よって

$$P = k \cdot (A/S)^\alpha (H/S)^\gamma (B/S)^\delta (D/S)^\phi (g/S^2)^\kappa (\mu/N\rho S^2)^\lambda S^\psi N^3 \rho$$

整理すると、

$$\begin{aligned}
 (P/S^5 N^3 \rho) &= k \cdot (A/S)^\alpha (H/S)^\gamma (B/S)^\delta (D/S)^\phi \\
 &\{1/(N S^2 \rho \mu)\}^\lambda \{1/(N^2 S/g)\}^\kappa
 \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式において、左辺はパワー数 (Power Number) である。従って所要動力を意味するパワー数は次の各要素に

関係することになる。

- (A/S) : ミル内径とスクリー径の比
- (H/S) : ボール高さとスクリー径の比
- (B/S) : ボール径とスクリー径の比
- (D/S) : ミル壁とスクリーの隙間とスクリー径の比
- (NS²ρ/μ) : レイノルズ数 (Reynolds Number)
- (N²S/g) : フルド数 (Froud Number)

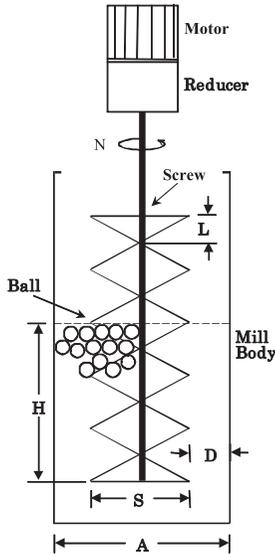


Fig.3 Diagram of Tower Mill

4.2 各要素のべきの検討

タワーミルにおけるボール高さと動力の関係はFig.4に示すようにスクリーのリード高さの1/4以上になると直線に近い関係を示す。よってボール量の要素(H/S)^γのべきγを1とした (γ=1)。

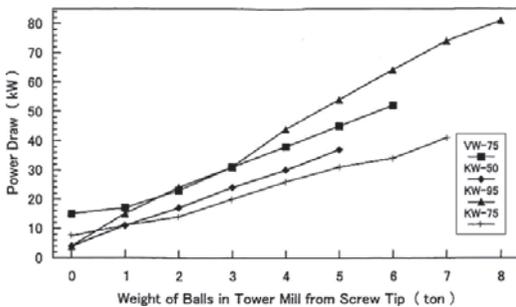


Fig.4 [Balls in Mill] & [Power Draw of Tower mill]

ボール径の効果(B/S)^δは次のように調べた。先ず上項で求めたγ=1を加味し(3)式を整理すると

$$\frac{(P/S^5 N^2 \rho) / [(A/S)^\alpha (H/S)^\lambda (D/S)^\delta \{ \mu / (NS^2 \rho) \}^\lambda \{ g / (N^2 S) \}^\kappa]}{k \cdot (B/S)^\delta} \quad (4)$$

(4)式ではべきα、φ、λ、κの影響を受けないつまり同一ミルでボール径の異なるデータを用いてべきδの値を求める。従って各べきα、φ、λ、κを0とすると(4)式は次のようになる。

$$(P/S^5 N^2 \rho) / (H/S) = k_2 \cdot (B/S)^\delta \quad (5)$$

(5)式を満たす55kWモーターを搭載した湿式タワーミルのデータをFig.5に示す。Figの中のデータdは他のデータa、b、cとは異なりボール量のベースが同一ではない、よって参考値とする。データa、b、cの傾きは水平に近いのでδ=0とした

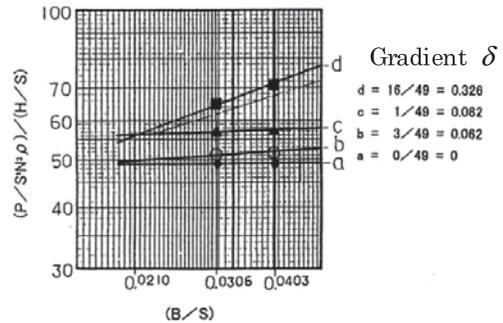


Fig.5 graph to calculate the power δ

スクリーの回転速度(N)は(3)式においてレイノルズ数、フルード数、パワー数の3項に関わっている。レイノルズ数、フルード数の項においてNとSは互いに干渉し合う。解析しやすくするために、清水中での動力を求めることでもあり液粘性の影響は小さいものとし、ここではレイノルズ数のべきを0とおく (λ=0)。同じく前項のδ=0とあわせて(3)式を整理すると

$$(P/S^5 N^2 \rho) / (H/S) = k_3 \cdot \{ (g/N^2 S) \}^\kappa \quad (6)$$

ここでSが一定でNが異なるKW-150型タワーミルの実機データを(6)式に沿うように整理するとFig.6になる。Figから傾きは1であるのでフルード数の逆数のべきを1とする (κ=1)。

ミル内径とスクリー外径の比の効果(A/S)^αは次のように調べた。この比の値(A/S)は実機では一定に取られており変化させてない。よって効果を確認できないのでα=0として定数kに含めた。

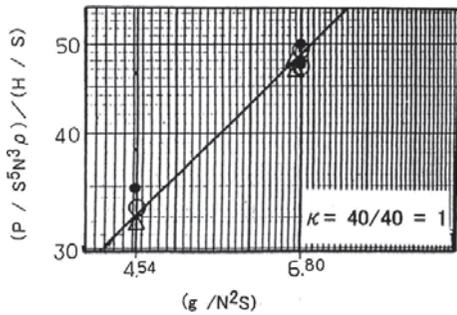


Fig.6 Graph to calculate the power of κ

ミルとスクリーの間隙とスクリー径の比 $(D/S)^\phi$ は次のように調べた。今までのべきの結果を加味し(3)式を整理すると

$$(P/S^5 N^3 \rho) / \{(H/S) (g/N^2 S)\} = k_4 \cdot (D/S)^\phi \quad (7)$$

(7)式の左辺(y)と右辺(X)のデータをFig.7に示す。Fig中の△▽のデータは55kWのモーターにも関わらず3.3kVで運転されており、しかも力率改善のためコンデンサーが装填されている。よって正確な電力値が不明な為回帰分析には含めない。回帰の結果は、 $y=38.95 \cdot X^{1.123}$ 、相関係数 $r=0.945$ 、サンプル数 $n=25$ で強い相関を示す。よって回帰式から、べきを $\phi=1$ とした。

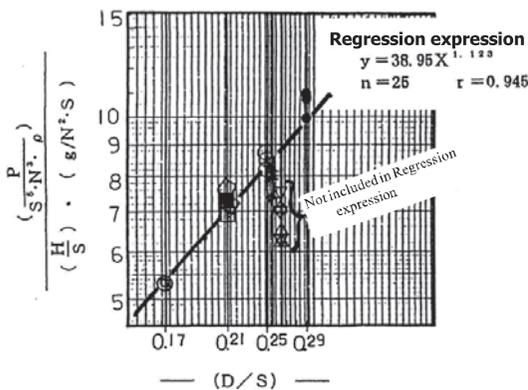


Fig.7 Graph to calculate the power of ψ

ここで、次元式のべきを次のように整理する。前項までの解析から(3)式を次のようにおく。

$$(P/S^5 N^3 \rho) = k_5 \cdot \{(H/S) (g/N^2 S)\} (D/S)^{1.123} \quad (8)$$

(8)式に合わせて実機のデータを加工してFig.8に示す。

Fig.中の△▽データは前項と同じ理由で回帰には含めない。回帰の結果は、 $y=41.47 \cdot X^{0.884}$ 、相関係数 $r=0.9898$ 、サンプル数 $n=35$ で強い相関関係を示す。ここで(8)式を次のように改める。

$$(P/S^5 N^3 \rho) = 41.47 \cdot \{(H/S) (g/N^2 S) (D/S)^{1.123}\}^{0.884} \\ = 41.5 \cdot (H/S)^{0.884} (g/N^2 S)^{0.884} (D/S)^{1.0} \quad (9)$$

(9)式から左辺のパワー数は①ボール量の0.884乗に比例し、②フルード数の逆数の0.884乗に比例し、③ミルとスクリーの間隙の1乗に比例することになる。

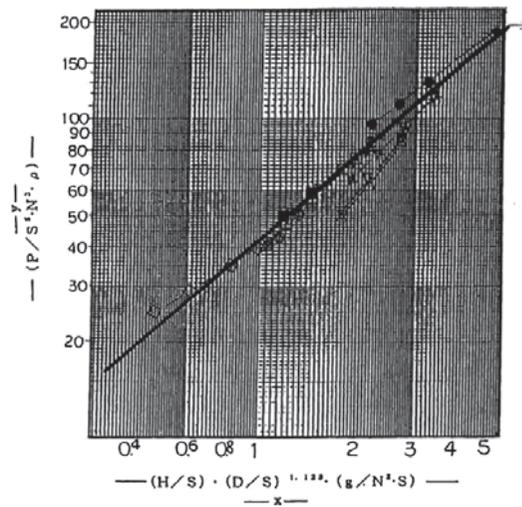


Fig.8 Graph to calculate each power

これまでの解析に使用したデータと(9)式により予測した計算値をFig.9に示す。特に高出力側において良い一緻性を示した。低出力側でバラツキが大きくなるがこれは(8)項で述べたデータに因るものでこのデータを除くと誤差は±10%となり十分実用に耐えられると言える。

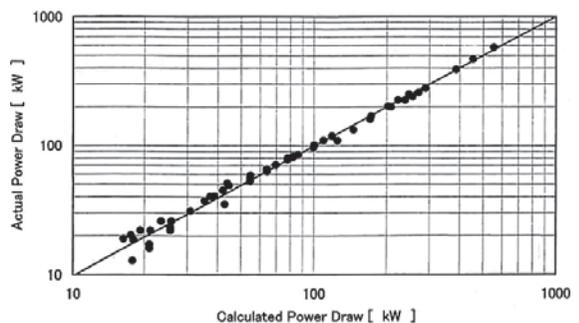


Fig.9 Comparison with actual and calculated power draw

ここまでの解析に使用したデータのモーターサイズは37kWから526kWである。このデータ範囲の2.2倍である1120kWのモーターを搭載したKW-1500型タワーミルの実績値と(10)式に依る計算値の比較結果をFig.10示す。誤差は約6%でありボール量が増加すると誤差は縮まる傾向を示した。また、絶対値及び勾配も計算値に合致した。

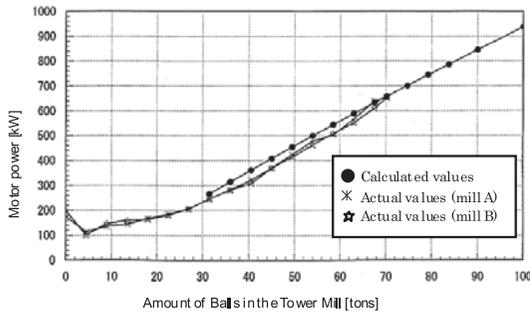


Fig.10 Relationship between amount of balls and power draw in Tower mill KW-1500

5. 分級性能と動力原単位の関係

粉砕操作において過粉砕が生じると動力原単位が大きくなるためエネルギーロスも増大する。このため、省エネルギーで粉砕を行うには微粒子を系外に排出し、粗粒子をミルに戻す分級操作が重要となる。そこで、重力加速度のみを利用する水簸分級およびポンプでスラリーを圧入し強制的に遠心力を利用するサイクロン分級で微粒子を分離した際の動力原単位を調べた。その結果をFig.11に示す。Group-Aは水簸を二段にした場合、Group-Bは粗粒子分級を水簸で行い、仕上げ分級をサイクロンで行った場合、Group-Cはサイクロンを二段にして分級した場合である。 $P_{80} = 35\mu\text{m}$ のケースを例にとると、Group-Aの動力原単位は20.5 (kWh/t)となる。Group-Bでは動力原単位が17.0 (kWh/t)でGroup-Aよりも17%減少し、Group-C:では12.5 (kWh/t)でよりも39%減少している。

次に、横型ボールミルに対してタワーミルがどの程度動力を低減しているかを調べる為に次のような総合的な比較検討を行った。一般に、ボールミルでは動力消費量をBond's Work Index (W_i)になるように運転条件を調整するので実際の動力原単位は W_i とほぼ等しい値を取る。ボールミル以外の粉砕機とその動力原単位を比較する場合、粒度等の条件を等しくして比較する考え方としてOperating Work Index (W_{io})がある。

$$W_{io} = \frac{W}{Q \times \{10 \times (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}})\} \times A_1} \quad (11)$$

W_{io} : Operating Work Index (kWh/t)

W : タワーミルの動力 (kW)

Q : 処理量 (t/h)

P_{80} : 粉砕産物の80%粒子径 (μm)

F_{80} : 原料の80%粒子径 (μm)

A_1 : 微粉砕係数 = $(P_{80} + 10.3) / (1.145 * P_{80})$

Fig.12に粉砕産物の80%粒子径とボールミルに対するタワーミルの動力原単位の比の関係を示す。なお、Fig.においてAは水簸分級とサイクロン分級、Bは水簸分級と水簸分級の組み合わせた場合の結果である。例えば $P_{80} = 35.3\mu\text{m}$ の粉砕産物を得るとすると、分級効率の劣るBでは W_{io}/W_i が0.68となる。これは、同じ分級回路を組んだ場合、タワーミルの動力原単位がボールミルに対して32%少ないことを意味している。一方、分級効率が良いAでは W_{io}/W_i が0.50となるのでタワーミルの動力原単位はボールミルの半分で済むことになる。

以上のことから、サイクロンを2回使用して分級することはそれ自体に動力が必要となるが、分級性能が向上することから過粉砕を抑制し、粉砕全体に要する動力原単位を低減化できると言える。

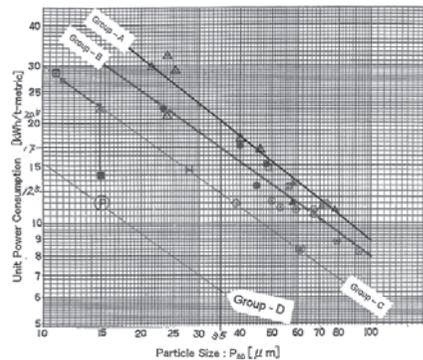


Fig.11 Particle size (P_{80}) vs unit power consumption for limestone grinding on Tower Mill

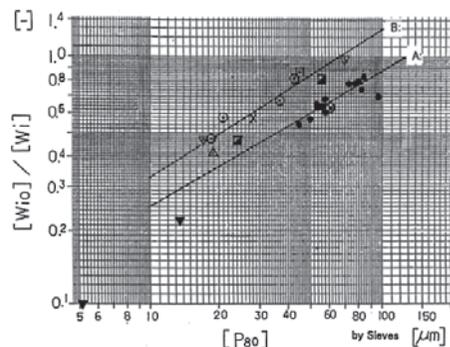


Fig.12 Relationship between W_{io}/W_i and P_{80} on wet type Tower Mill

6. まとめ

適正なモーターサイズを選択することは、粉砕に消費する動力は勿論のこと過剰スペックによる無効電力を削減することができる。また、湿式閉回路粉砕を設計するに当たり、分級機の役割は非常に大切である。タワーミル粉砕において、微粉砕域になるほどその効果が顕著に現れる。今回の次元解析に拠る動力の予測と適切な分級機による動力原単位の低減化は粉砕工程の省エネルギー化に大きく寄与するものであると考える。

References

1. H. Ohya and S. Endo: Proc. of MMIJ Annual Autumn Meeting II (Morioka), C9-3, pp.171-172 (2004)
2. S. Nitta, A. Bissombolo, T. Furuyama and S. Mori: Int. Journal of Mineral Processing, **66**, pp.79-87 (2002)
3. S. Nitta, S. Mori and T. Furuyama: Resources Engineering, **50**, pp.16-21 (2003)
4. A. Shibayama and S. Mori: Resources Engineering, **46**, pp.24-30 (1999)

工業加熱炉における省エネ技術の実用化¹

田辺大二²・北村隆²・木村正人³・大矢仁史⁴

Commercialization of energy conservation in the thermal technology

Daiji TANABE, Takashi KITAMURA,
Masato KIMURA and Hitoshi OHYA

TANABE Corporation^{2,3}, The University of Kitakyushu⁴

Abstract

An industrial furnace is a heating device in which the materials or parts are dissolved, baked and dried to achieve the physical and chemical change in the refinement and the processing. It consumed lots of fuel and electric power and the technology of the energy conservation are required to correspond to high energy prices and a lot of CO₂ emissions.

It is introduced to develop the energy conservation type industrial furnace using exhaust heat recovery and appropriate energy such as natural gas and unutilized process gas. We also tried to find the new application in the environmental field to protect the global environment.

Key words: Industrial furnace, Energy saving, CO₂ reduction,
Exhaust heat recovering

1. 緒 言

一般的に工業炉とは、産業界において素材あるいは部品の精錬・加工・仕上げ等の製造工程で、要求される物理的・化学的変化を達成させるために溶解・焼成・乾燥等を行う加熱装置である。

工業炉は、要求プロセスを達成するために燃料や電力を多量に消費する装置であり、昨今の地球温暖化問題、燃料価格の高騰に対応するため、これまで以上にエネルギー使用量の低減・CO₂排出量の削減が求められている。

工業炉の省エネルギーとして石油危機後の1979年(昭和54年)に制定された省エネルギー法により、エネルギー使用量の大きい工場における、「空気比」・「炉壁外面温度」・「廃熱回収率」の目標設定がなされた。

又、NEDOを中心に1993年より高性能工業炉の開発

が進められ、リジェネバーナ等の開発により大幅な省エネルギーを実現し・CO₂・NO_x排出量の削減を達成し現在普及に向けた活動に取り組んでいる。

当社は、半世紀にもおよぶ工業炉の豊富な実績とノウハウを核に熱システムの事業領域を製錬・溶融から環境分野、さらに新素材分野へと広げた取り組みを行っている。

省エネルギー・CO₂削減技術としては、溶融精錬炉におけるCOガス等可燃性排ガスの回収再利用技術、排ガスによる原料予熱技術等を開発し、マンガ・クロム等の大型溶融精錬プラントを国内外のユーザーに提供し省エネルギーに大きく貢献して来た。

また現在、重油等の液体燃料・プロパンガス等の石油液化ガスから液化天然ガス(LNG)・都市ガス(13A)への燃料転換によるCO₂排出量の削減、各種加熱工程で発生する可燃性ガスエネルギーの有効利用、廃熱からの蒸気回収によるさらなる熱の有効利用とCO₂排出量の削減に取り組んでいる。

以下に工業炉における省エネルギー・CO₂削減の実施例を紹介する。

1. 平成21年11月12日 本会第123回例会において発表

2. (株) タナベ 事業開発

3. (株) タナベ 事業企画室

4. 北九州市立大学 国際環境学部

平成21年8月27日受理

2. 省エネ型工業炉の開発

2.1 熱風循環式エナメル線焼付炉

本加熱装置(焼付炉)は、現在話題になっているハイブリット自動車や電気自動車等に搭載されるモータを構成するエナメル線を製造するガスバーナを熱源とする工業炉である。

エナメル線：6は、銅線：5にエナメル塗布装置：4で絶縁物のエナメル塗料を塗布し、加熱ヒータ：3で乾燥・焼成する工程を複数回繰返して、絶縁性・耐熱性等の要求仕様を満足する製品になる。

銅線に塗布される絶縁塗料はエナメル成分をフェノール・キシレン等の溶剤で希釈して用い、これまでの一般的な焼付炉 Fig.1 では、乾燥工程で発生するこれらの溶剤をそのまま炉外に排出し別途排ガス処理装置：1で排ガス処理を行っていた。

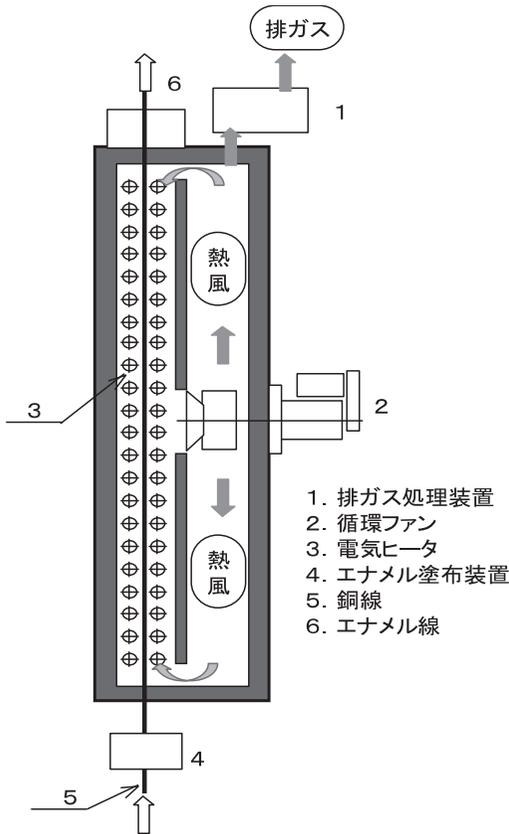


Fig.1 Example of typical encaustic kiln

Fig.2 の省エネタイプ熱風循環式焼付炉では、炉内に設置した酸化触媒：1により溶剤成分を燃焼させ、その燃焼排ガスを循環ファン：2で焼成・乾燥工程に循環することにより、熱リサイクルを行い大幅な省エネルギーを実現している。

また、炉内で溶剤成分を燃焼無害化させているため、外部に脱臭装置等の新たな設備が不要になり設備のコンパクト化・設備コストの低減もはかれる。

Fig.2 の省エネタイプ熱風循環式焼付炉は、熱源をLPGやLNG等のガス燃料としているので上記触媒熱リサイクル方式と相まって、Fig.1 の電気ヒータ方式の一般的な焼付炉と比較し、エネルギーコストを大幅に低減できるだけでなく、CO₂排出量も約30%削減できる。

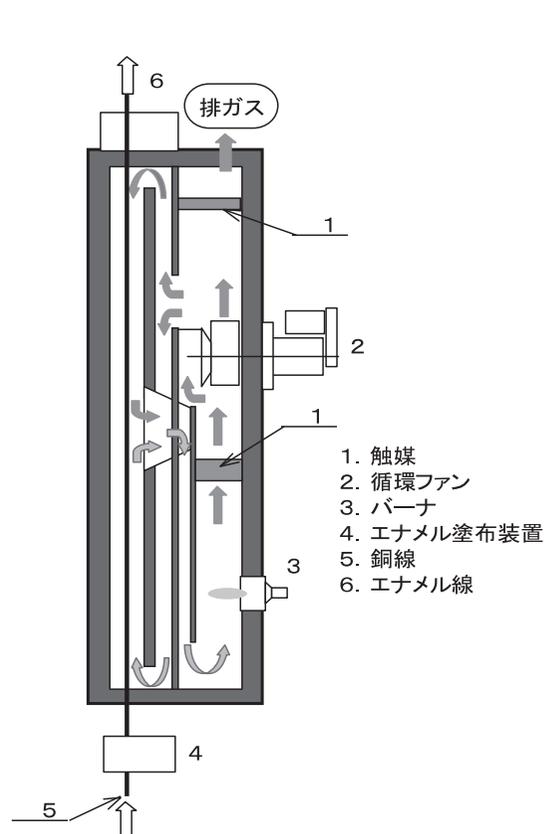


Fig.2 Example of energy saving and hot wind circulating type encaustic kiln

2.2 省エネタイプ熱風循環式マッフル炉

太陽電池製造プロセス等の真空加熱装置に使用されるカーボン断熱材等の焼成用として開発された省エネルギータイプのバーナを熱源とする工業炉である。

カーボン断熱材等の焼成工程では、処理物：7に含まれるタール・ピッチ等が昇温課程で熱分解されて多量の可燃性ガスが発生するため、これらの熱分解ガスを安全に無害化する必要がある。

これまでは、Fig.3の一般的なマッフル炉の例に示したように電気ヒータ：4で加熱されて処理物：7から発生した可燃性ガスは、そのまま炉外に排出されて後段に設置された脱臭炉：5や排ガスクラバー等で排ガス処理を行って大気に放出していた。

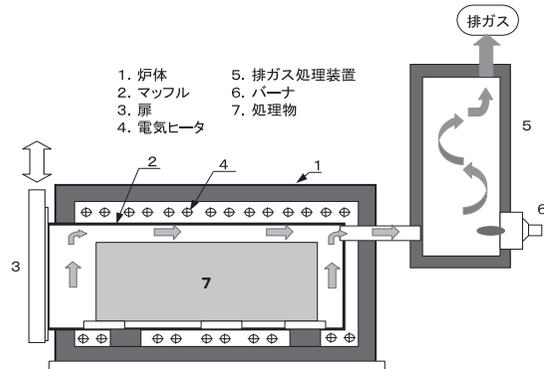


Fig.3 Example of typical muffle kiln

Fig.4の省エネタイプ熱風循環式マッフル炉では、発生する熱分解ガスのエネルギーを有効に利用するため、バーナ：6の燃焼排ガスでマッフル：2を介して処理物：7を加熱し、発生した熱分解ガスを循環ファン：4で脱臭バーナ：5に導入し安全に燃焼させた後再燃焼炉：8に循環する排ガス循環・再燃焼プロセスを構築する事により、バーナ：6の燃料使用量を大幅に削減する事を可能にした。

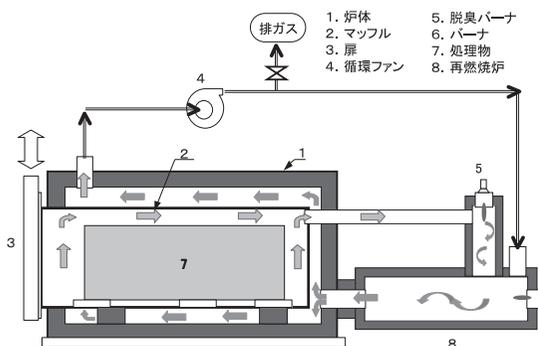


Fig.4 Example of energy saving and hot wind circulating type muffle kiln

Fig.5に省エネタイプ熱風循環マッフル炉の燃料削減例を示した。マッフル内温度の上昇とともに処理物：7から発生する可燃性ガスを脱臭バーナ：5で燃焼することによりバーナ：6の燃料消費量が低下している。燃料消費量は、処理物：7から発生する可燃性ガス量に依存するが、15%～30%以上の燃料削減が可能である。

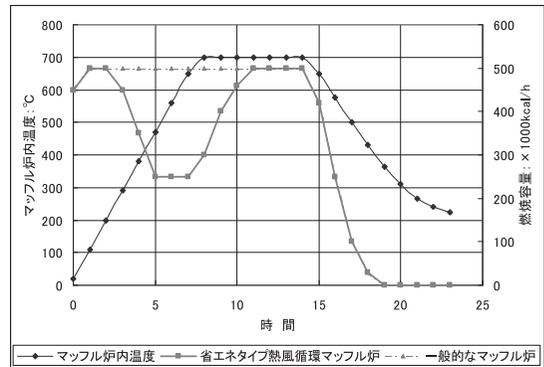


Fig.5 Fuel consumption of energy saving and hot wind circulating type muffle kiln

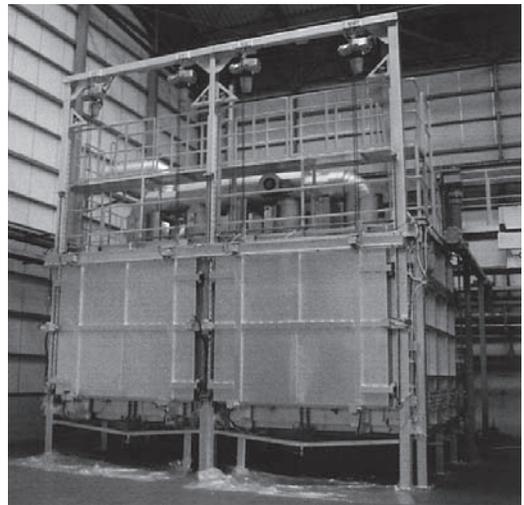


Fig.6 Energy saving and hot wind circulating type muffle kiln

2.3 過熱水蒸気雰囲気外熱式キルン

工業炉の熱処理装置として、大型のセメント用キルンに代表されるような回転炉は種々の産業分野で多く用いられている。

そのキルンと Fig.7のように装置外観は同じであるが、外熱式単胴キルンとは異なり、熱効率を高め、低コストで

反応性に優れた過熱水蒸気 (Super Heated Steam:略称 SHS) をキルン内部に吹き込む構造を組み合わせた熱処理システムとして、過熱水蒸気雰囲気外熱式キルンを開発した¹⁾。

過熱水蒸気は、沸騰化した水 (飽和水蒸気) を再加熱して沸点以上の温度とした水蒸気を意味し、有機物の分解、除去を行うことができ、対象処理物の乾燥や殺菌に利用するなど空気存在下では難しかった処理が可能な技術として食品業界では一般的に用いられてきた。

過熱水蒸気を用いると常圧での操作が可能なことから低コスト、低環境負荷でバイオマスや有機成分などを燃焼せずに熱分解することや炭化処理することができる。また、ここで取り上げる過熱水蒸気雰囲気外熱式キルンは、粉体製品のハンドリングが容易な装置であり、粉体製品の熱処理、金属切削粉の脱脂処理などのリサイクル分野での応用が期待できる。

ここで紹介する過熱水蒸気雰囲気外熱式キルンは過熱水蒸気の利点を活かしながら、システムの熱効率向上の観点から省エネ化を視野に入れて開発してきたものである。特にここで着目したのは過熱水蒸気が保有する熱量である。例えば 500℃では、空気が 54.3kcal/m³、過熱水蒸気が 238kcal/m³ と 4 倍以上の熱量差があり、体積あたりの保有する熱量は圧倒的に高く、工業炉内での高いエネルギーポテンシャルを利用した高効率・短時間での熱処理が出来る。

Fig.8 に示すような熱回収システムを用いた工程では、高温熱媒体である過熱水蒸気で熱処理を行い、処理後の排ガス系統では、熱処理後の排出ガスに含まれる有機成分の分解物を利用して燃焼し、キルン外部 (外筒) の熱源として利用している。

近年では排出ガスの燃焼エネルギーで蒸気を発生させ再利用することで、大幅なエネルギー、CO₂ の削減、低コスト化を実現した。

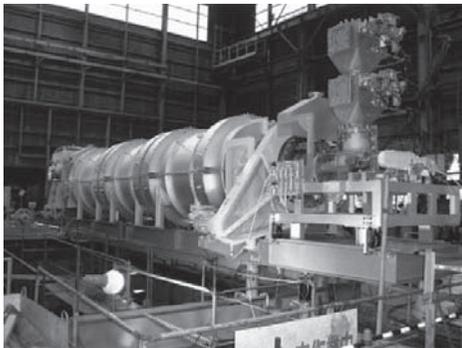


Fig.7 SHS kiln

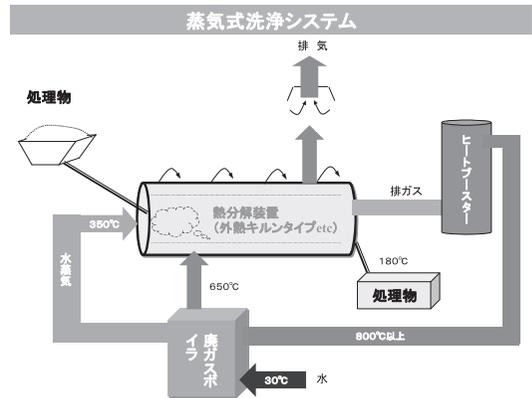


Fig.8 Schematic diagram of heat recovery system

過熱水蒸気をリサイクル分野に用いた例として、軽量材料として今後の利用拡大が期待できるマグネシウム切削粉の浄化技術²⁾や廃木材、有機性廃棄物処理技術³⁾が最近紹介されている。

3. 結 言

昨今の地球温暖化防止の大きな流れに対応するために、工業炉の分野でも今後益々省エネルギー、CO₂削減のニーズが増えてくる。

弊社としても、製造プロセスの見直しによる省エネルギーやLNG等への燃料転換・発生エネルギーの有効活用を今後も継続して進めるとともに、現在まだ十分に利用できていない、中低温排ガスからのエネルギー回収と回収エネルギーの有効活用を促進したい。

また、回収エネルギーを電気のように活用しやすいエネルギー形態に変換する方法についても研究を進めていく。

References

1. S. Yoshida, K. Sato and H. Matsubara: Tokyo Koho(Japan) No.2524665 (1996)
2. S. Koyanaka, T. Yamamoto, M. Kobayashi, H. Ohya, M. Kimura and K. Yoshida: Funtaikogakukai Shukikenkyuhappyoukaikoenronbunshu, Tokyo, pp.73-74 (2008)
3. Kanetsusuijokigijutu, NTS shuppan(Tokyo), pp.85-94 pp.129-143 (2005)

新エネルギー普及と CO₂ 排出削減

— ロジスティック曲線を組み込んだラムゼーモデルによる経済分析 —¹
島瀬 和志²

Energy Technology Diffusion and CO₂ Emission Reduction
— An Economic Analysis by the Ramsey Model Combined with a Logistic Curve —

Kazushi HATASE

Graduate School of Economics, Kobe University

Abstract

This paper presents an energy-economy model of climate change that considers structural change in the energy sector by means of a logistic curve. In the study described here, the global economy is viewed as a Ramsey model, and the diffusion of new carbon-free energy in the energy sector is modeled through a combination of logistic curve and learning by doing. The simulation results of our study show that learning by doing plays a crucial role in determining the optimal CO₂ emission reduction policy. High learning makes the optimal starting point of technology change earlier, and lessens the costs of CO₂ emission reduction. The simulation results also indicate the need to consider the effect of socio-economic inertia. High socio-economic inertia, like high learning, favors making a technology change sooner rather than later.

Key words: Carbon dioxide emissions, Technological change, Ramsey model, Logistic curve, Learning by doing

1. 緒 言

CO₂ 排出削減においては、エネルギー利用効率の改善、エネルギー消費の抑制とともに、CO₂ 排出が少ない新エネルギーの普及が重要である。新エネルギーの普及は、論理的にはエネルギー消費量を変えずに CO₂ 排出削減を行うことを可能にするが、一方では既存のエネルギーよりもコストが高くなるため、望ましい新エネルギー普及経路を検討するにあたっては、経済性の分析が不可欠となる。こうした政策的な要請によって、2000 年頃より、新エネルギー普及を考慮したエネルギー経済モデルの開発が行われてきた。代表的なモデルとしては、DEMETER^{1,2}、ENTICE-BR³、WITCH⁴ が挙げられる。しかし、長期にわたる新エネルギー普及の経路を予測することは原理的に困難であり、この要素のモデル化は未だ発展途上の段階にある。本研究で用いるエネルギー経済モデルは、Hatase⁵ に改良を施したものである。このモデルは、DICE⁶ や MERGE⁷ に代表される、ラムゼー型の動学的最適化モデルであるが、ロジスティック曲線を用いて新エネルギー普及をモデル化している点で他のモデルとは異なる。ロジスティック曲線を用いる利点は、既存

エネルギーから新エネルギーへの移行に対する社会経済的な抵抗をモデル化出来る点にあり、これは過去に開発されたラムゼー型のエネルギー経済モデルでは扱うのが困難な課題である。この点を考慮し、本研究では、新エネルギー普及への抵抗（社会経済的慣性）の度合いが最適な CO₂ 排出削減の経路にどのような影響を及ぼすかを中心に分析を行った。

シミュレーションにあたっては、CO₂ 濃度に安定化目標値を設定し、この目標値を超えない水準を維持しつつ効用の総和を最大化する CO₂ 排出削減経路を計算した。将来シナリオの設定においては、新エネルギー普及を決定づける 2 つのパラメータに注目し、4 種類のシナリオを設定した。シミュレーション結果については、CO₂ 排出削減経路、新エネルギー普及経路、CO₂ 削減費用について検討を行い、それらを総合して政策的含意を得た。

2. シミュレーションモデル

本研究で用いたモデルは、ラムゼーモデルとロジスティック曲線を組み合わせたものであり、世界経済、エネルギー部門の技術変化、気候変動をモデル化した方程式によって構成される。

2.1 世界経済

世界を 1 経済地域と見なし、ラムゼー型の動学的最適

1. 平成 21 年 11 月 12 日 本会第 123 回例会において発表
2. 神戸大学大学院経済学研究科
平成 21 年 7 月 24 日受理

化モデルを適用する。モデルは効用 $U(t)$ の総和の割引現在価値を最大化する。

$$\max \sum_{t=0}^T \left(\frac{1}{1+\rho} \right)^t U(t), \quad U(t) = L(t) \log \left(\frac{C(t)}{L(t)} \right) \quad (1)$$

ここで、 $L(t)$ は時点 t における労働投入、 $C(t)$ は消費、 ρ は純粋時間選好率である。総生産 $Y(t)$ は次の生産関数によって計算される。

$$Y(t) = \left[\alpha(t) \left(K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \beta(t) E(t)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (2)$$

ここで、 $K(t)$ は資本、 $E(t)$ はエネルギー投入、 σ は付加価値 (K+L) とエネルギー投入の間の代替の弾力性、 $\alpha(t)$ は付加価値 (K+L) についての技術進歩の水準、 $\beta(t)$ はエネルギー技術進歩の水準、 γ は資本の分配率である。労働投入 $L(t)$ の時間変化は外生的に与える。また、資本ストックの蓄積は、 $I(t)$ を投資、 δ を資本減耗率として次式で記述される。

$$K(t+1) = (1-\delta)K(t) + I(t) \quad (3)$$

時点 t における総生産 $Y(t)$ は、消費 $C(t)$ 、投資 $I(t)$ 、エネルギー生産費用 $EC(t)$ に分配されるものとする。

$$Y(t) = C(t) + I(t) + EC(t) \quad (4)$$

なお、エネルギー生産費用 $EC(t)$ は、 $p(t)$ をエネルギー価格として $EC(t) = p(t)E(t)$ によって計算される。

2.2 エネルギー部門の技術変化

エネルギー技術には化石エネルギーと CO_2 を排出しない新エネルギーの 2 種類を仮定する。このうち新エネルギーの普及はロジスティック曲線⁸と Learning by Doing⁹を組み合わせることによってモデル化する。式(2)のエネルギー投入には $E(t)$ という 1 つの変数しかないが、新エネルギーのシェア $S(t)$ という変数を導入すると、化石エネルギー投入を $(1-S(t))E(t)$ 、新エネルギー投入を $S(t)E(t)$ と表わすことができる。

新エネルギー普及はロジスティック曲線を用いてモデル化する⁸。新エネルギーのシェア $S(t)$ はロジスティック曲線に沿って時間変化すると仮定する。

$$\frac{dS}{dt} = aS(1-S) \quad (5)$$

ここで、 a は係数として外生的に与えられる。しかし、式(5)をラムゼーモデルに組み込むと計算結果に問題が生じる。すなわち、式(5)は新エネルギー普及をラムゼーモデルとは全く独立に計算するため、本来の最適な普及経路から離れた解を生み出す。このため、式(5)を以下のように修正する。

$$\frac{dS}{dt} \leq aS(1-S) \quad (5')$$

式(5')は新エネルギー普及の速度 dS/dt に上限を設け、それをロジスティック曲線に沿った変化量とすることを意味する。新エネルギー普及速度に対するこうした上限の設定は、社会経済的慣性¹⁰ (Socio-Economic Inertia) と関連を持つ。エネルギー設備の耐用年数は長く、一度化石エネルギー用のものが建設されると簡単には新エネルギー用には変更出来ない。また、製油所や港湾などのエネルギーインフラと個々のエネルギー設備には複雑な相互依存関係がある。これらの原因により、既存エネルギーから新エネルギーへの移行には社会経済的な抵抗 (これを社会経済的慣性と呼ぶ) が生じる。式(5')の係数 a は、社会経済的慣性の度合いを規定するパラメータと解釈出来る (係数 a は小さいほど社会経済的慣性が大きい)。シミュレーションプログラムにおいては、式(5')を次のように有限差分化した形で用いる。

$$S(t+1) \leq S(t) + aS(t)(1-S(t))\Delta t \quad (6)$$

新エネルギーの価格変化は Learning by Doing (学習効果) によってモデル化する。Learning by Doing は、上に挙げたモデルの中では、DEMETER¹² と WITCH⁴ で用いられている。新エネルギー価格 $p_N(t)$ が Learning by Doing に従って経験蓄積とともに低減すると仮定すると、以下の式が成り立つ。

$$p_N(t) = p_N(0) \left(\frac{W(t)}{W(0)} \right)^{-b} \quad (7)$$

ここで、 $W(t)$ は時点 t における新エネルギーの累積経験量、 b は経験指数である。シミュレーションプログラムにおいては、式(7)を Anderson & Winne¹¹ に従って次のように有限差分化して用いる。

$$p_N(t+1) = p_N(t) - b(p_N(t) - p_N^{\min}) \frac{W(t+1) - W(t)}{W(t+1)} \quad (8)$$

ここで、 p_N^{\min} は新エネルギー価格の漸近的下限である。新エネルギーの累積経験量 $W(t)$ については、次のように新エネルギーの累積設備容量を用いて代替する。

$$W(t) = \sum_{\tau=0}^{t-1} [S(\tau+1)E(\tau+1) - (1-\delta_N)S(\tau)E(\tau)] \quad (9)$$

ここで、 δ_N は新エネルギー設備の資本減耗率である。新エネルギー価格が経験の蓄積により低減する一方、化石エネルギー価格は化石資源の採掘に伴って上昇すると仮定する。ここでは DICE-99 モデル¹² に従い、化石エネルギー価格 $p_F(t)$ を、化石資源採掘の限界費用 $q_F(t)$ とマークアップ (運送費用、販売費用、税金等に相当) の和として計算する。

Table 1 Simulation Scenarios and Parameter Settings

Scenario	a : Coefficient of Logistic Curve	b : Experience Index
STC+LL	0.05	0.1
STC+HL	0.05	0.5
FTC+LL	0.15	0.1
FTC+HL	0.15	0.5

$$p_F(t) = q_F(t) + Markup \quad (10)$$

化石資源採掘の限界費用は次の式により計算する。

$$q_F(t) = \xi_1 + \xi_2 \left(\frac{CumC(t)}{CumC^{max}} \right)^4 \quad (11)$$

ここで、 ξ_1 と ξ_2 はパラメータ、 $CumC^{max}$ は採掘可能な上限量である。 $Markup$ 、 ξ_1 、 ξ_2 、 $CumC^{max}$ のパラメータ値には DICE-99 モデル¹²で使用されている値を用いる。最後に、エネルギー価格 $p(t)$ を化石エネルギー価格と新エネルギー価格の重みづけ平均として計算し、式(4)にフィードバックすることによりモデルを閉じる。

$$p(t) = p_F(t)(1-S(t)) + p_N(t)S(t) \quad (12)$$

2.3 気候変動

気候変動モデルには、簡略化された CO₂ 蓄積モデルを適用する。

$$M(t+1) = M(t) + Emis^{Anth}(t) + Emis^{Nat}(t) - \mu M(t) \quad (13)$$

ここで、 $M(t)$ は CO₂ 蓄積量、 $Emis^{Anth}(t)$ は人為起源 CO₂ 排出、 $Emis^{Nat}(t)$ は自然起源 CO₂ 排出、 μ は大気中からの CO₂ 除去率である。人為起源 CO₂ 排出は化石エネルギーのみから生じるものと仮定し、以下の式で計算する。

$$Emis^{Anth}(t) = \theta_F (1 - S_N(t)) E(t) \quad (14)$$

ここで、 θ_F は化石エネルギーの CO₂ 排出強度である。他方、自然起源 CO₂ 排出は DEMETER モデル¹²のパラメータ設定にならい一定とする。また、CO₂ 蓄積量には最適化シミュレーションのために安定化目標値 M^{max} を設

Table 2 Common Input Parameters of the Four Simulation Scenarios

Parameter	Description	Value
ρ	Pure time preference rate	2% per year
$K(0)$	Capital in 2000*	\$76.746 (trillion)
$Y(0)$	Gross output (GWP) in 2000*	\$29.068 (trillion)
$E(0)$	Total energy input in 2000	6.628 GtC
δ	Depreciation rate on capital	7% per year
γ	Capital's value share	0.31
σ	Elasticity between $K-L$ and E	0.40
$S(0)$	Share of new energy in 2000	4.2%
$p_N(0)$	Price of new energy in 2000*	1000 \$/tC
p_N^{min}	Lowest possible price of new energy*	250 \$/tC
δ_N	Plant's depreciation rate of new energy	7% per year
g_N	Growth rate of new energy inputs	4.8% per year
Markup	Markup on fossil energy price*	163.29 \$/tC
ζ_1	Parameter on marginal cost of fossil energy*	113 \$/tC
ζ_2	Parameter on marginal cost of fossil energy*	700 \$/tC
$CumC^{max}$	Maximum possible extraction of fossil energy	6000 GtC
$M(0)$	Carbon accumulation in the atmosphere in 2000	786 GtC
μ	Removal rate of CO ₂ from the atmosphere	0.6% per year
θ_F	Emission intensity of fossil energy	1.0
$Emis^{Nat}(0)$	Natural CO ₂ emissions in 2000	1.33 GtC per year

* Figure in 1990 US dollars

定する。

$$M(t) \leq M^{\max} \quad (15)$$

3. パラメータ設定

本研究では、以上で解説したモデルを用い、4種類の将来シナリオを設定してシミュレーション計算を行った。以下においては、これらの将来シナリオとパラメータ設定について記述する。

3.1 シミュレーションのシナリオ

シミュレーション計算は、新エネルギー普及を決定づける要素である社会経済的慣性とLearning by Doingによる新エネルギー価格の低減が、最適なCO₂排出削減の経路にどう影響するかを調べることを目的とした。これらの2つの要素については、社会経済的慣性の度合いを式(5)の係数 a として、Learning by Doingの度合いを式(7)の経験指数 b として定義した。本研究では、上記の2つのパラメータを組み合わせた4種類の将来シナリオとして、STC (Slow Technological Change) + LL (Low Learning Rate)、STC + HL (High Learning Rate)、FTC (Fast Technological Change) + LL、FTC + HLを設定した。これらの4つのシナリオにおけるパラメータ設定をTable 1にまとめて示す。

3.2 パラメータ設定

シミュレーション計算は、2000年を起点として10年ステップで行った。CO₂の安定化目標値 M^{\max} は500 ppm (1060 GtC) に設定し、この目標値を超えない水準を維持しつつ効用の総和 (式(1)) が最大になるCO₂排出削減経路を計算した。ロジスティック式の係数 a とLearning by Doingの経験指数 b 以外のパラメータは、4種類の将来シナリオにおいて共通であるとした。これらの共通パラメータをTable 2に示す。なお、これらのパラメータは主に、Gerlagh & van der Zwaan²を参照している。式(13)の気候変動モデルについては、IPCCの排出シナリオIS92aを想定した大規模気候変動モデルの計算結果¹³を利用し、 $M(0)$ と μ の値をカリブレートした。また、エネルギー投入 $E(t)$ は炭素換算 (単位はGtC) でパラメタライズし、CO₂排出強度 θ_p を1.0に設定した。

3.3 生産関数のカリブレーション

生産関数のカリブレーションには、MERGEモデル⁷に用いられた方法を適用した。式(2)の生産関数において、 γ と σ の値はTable 2に示した通り、既にパラメータとして与えられている。一方、 $\alpha(t)$ と $\beta(t)$ の値は、式(2)と式(4)を微分、整理した以下の式を用いてカリブレートした。

$$\alpha(t) = \frac{Y_{REF}(t)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} - \beta(t) E_{REF}(t)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}}{\left(K_{REF}(t)^{\gamma} L(t)^{1-\gamma} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}} \quad (16)$$

$$\beta(t) = \frac{P(0) Y_{REF}(t)^{\frac{1}{\sigma}}}{E_{REF}(t)^{\frac{1}{\sigma}}} \quad (17)$$

ここで、 $Y_{REF}(t)$ 、 $K_{REF}(t)$ 、 $E_{REF}(t)$ はそれぞれ、総生産 Y 、資本 K 、エネルギー投入 E の推定値であり、以下のように見積もった。

$$Y_{REF}(t) = Y(0) \frac{A(t)L(t)}{L(0)} \quad (18)$$

$$K_{REF}(t) = K(0) \frac{A(t)L(t)}{L(0)} \quad (19)$$

$$E_{REF}(t) = E(0) \frac{A(t)L(t)}{L(0)} \prod_{\tau=1}^t (1 - EEI(\tau)) \quad (20)$$

ここで、 $A(t)$ は労働生産性、 $EEI(t)$ はエネルギー効率改善である。

4. 計算結果および考察

シミュレーション計算には、GAMS (General Algebraic Modeling System) を利用し、最適化ソルバーCONOPTを用いて解を求めた。以下においては、CO₂排出削減量、新エネルギーのシェア、CO₂削減費用について計算結果を示し、考察を行う。

4種類のシナリオにおける最適なCO₂排出削減経路 (CO₂排出削減量の時間変化) をFig.1に示す。ここで、CO₂排出削減量は、それぞれのシナリオにおける、CO₂排出削減を行わない場合の結果とCO₂安定化目標値(500

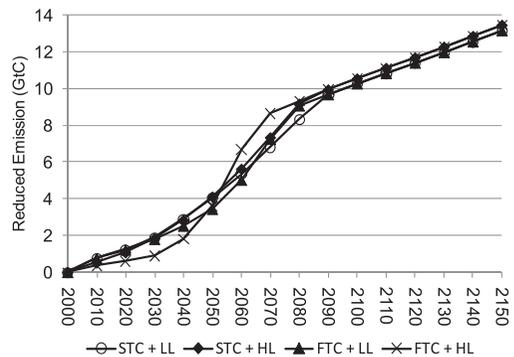


Fig.1 Reduced CO₂ Emission

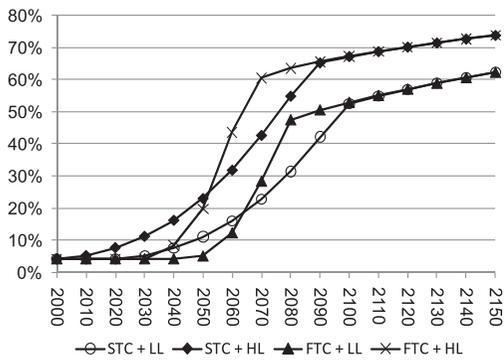


Fig.2 Share of New Energy

ppm) を設定した場合の結果の間での、CO₂ 排出量の差として計算した。FTC+HL シナリオにおける CO₂ 排出削減経路は、他のシナリオにおけるそれと異なり、S 字型の曲線となる。すなわち、FTC+HL シナリオにおける CO₂ 排出削減量の増加は当初は小さいが、時間とともに徐々に大きくなる。他方、他の 3 種類のシナリオ (STC+LL, STC+HL, FTC+LL) における CO₂ 排出削減経路は S 字型というよりも直線的であり、CO₂ 排出削減量は時間に伴ってある程度コンスタントに増加する。これらの結果は、社会経済的慣性が小さく同時に Learning by Doing の度合いが大きい条件では、21 世紀初頭はあまり CO₂ 排出削減を行わず 21 世紀中頃以降に急激な CO₂ 排出削減を行うのが望ましいが、それ以外の条件では、21 世紀初頭からコンスタントに CO₂ 排出削減量を増やしていくのが望ましいということを示している。

4 種類のシナリオにおける新エネルギーのシェアの時間変化を Fig.2 に示す。CO₂ 排出削減経路 (Fig.1 参照) がシナリオ間で大きくは変わらないのと比べ、新エネルギー普及経路 (新エネルギーシェアの時間変化) はシナリオによって非常に異なったものとなる。このことは、社会経済的慣性と Learning by Doing の度合いが、CO₂ 排出削減経路よりも新エネルギー普及経路に対してより強く影響することを意味する。Fig.2 は、社会経済的慣性が大きいほど (係数 a の値が小さいほど)、また Learning by Doing の度合いが大きいほど (経験指数 b の値が大きいほど)、より速やかに化石エネルギーから新エネルギーに転換することが望ましいということを示している。社会経済的慣性が大きい場合、同じ CO₂ 排出削減目標を達成するのに長い時間を必要とするため、より速やかに化石エネルギーから新エネルギーに転換しなければ CO₂ 排出削減目標を達成することが出来ない。逆に、社会経済的慣性が小さい場合、新エネルギー普及の開始を先送り出来るが、一旦普及が開始した後は急速な新エネルギーへの転換が必要となる。Learning by Doing の度合い

の影響については、Learning by Doing の度合いが大きいほど新エネルギー価格の低減が大きいと、より速やかな新エネルギーへの転換が可能となる。以上の理由により、STC+HL シナリオ (社会経済的慣性が大きく、Learning by Doing の度合いが大きい) において、新エネルギー普及が最も早く始まる。

4 種類のシナリオにおける CO₂ 削減費用の時間変化を Fig.3 に示す。ここで、CO₂ 削減費用は、それぞれのシナリオにおける、CO₂ 排出削減を行わない場合の総生産 $Y(t)$ と CO₂ 安定化目標値を設定した場合のそれとの間での、総生産の減少率として計算した。4 種類のシナリオ全てにおいて、CO₂ 削減費用は当初は小さいが徐々に増加し、21 世紀中頃～21 世紀末にピークとなる。CO₂ 削減費用の大きさは、Learning by Doing の度合いに強く依存し、Learning by Doing の度合いが大きいほど CO₂ 削減費用が小さくなる。これは、Learning by Doing の度合いが大きいほど新エネルギー価格の低減が大きく、より効率的な CO₂ 削減が可能になるためである。社会経済的慣性については、大きい方が CO₂ 削減費用は大きくなるが、Learning by Doing の度合いと比較すると副次的な影響しか持たない。なお、Learning by Doing の度合いが同じであれば、社会経済的慣性の大きさに関わらず、21 世紀初頭と 22 世紀以降の CO₂ 削減費用が同じか近い値になる点が注目される。

以下においては、これらの結果を総合し、政策的含意を考察する。CO₂ 排出削減経路については、社会経済的慣性が小さく同時に Learning by Doing の度合いが大きい条件では、21 世紀初頭にはあまり CO₂ 排出削減を行わないことが望ましいが、それ以外の条件では、21 世紀初頭からコンスタントに CO₂ 排出削減量を増やしていくのが望ましいという計算結果が得られた。ここで現実を鑑みると、Learning by Doing の度合いについては研究者の間で十分なコンセンサスが得られているとは言えないが¹⁴、社会経済的慣性については大きいということではほぼ間違

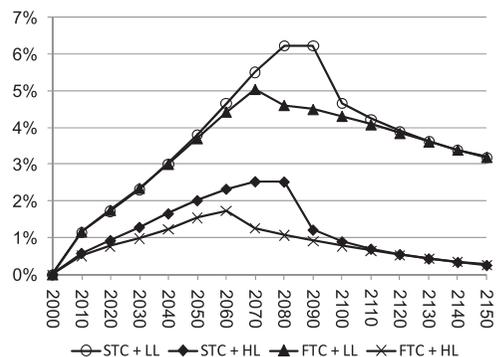


Fig.3 Cost of CO₂ Emission Reduction

いはない¹⁰。したがって、本研究の結果と現実を照らし合わせると、CO₂排出削減量は21世紀初頭からコンスタントに増やすことが望ましいと結論出来る。

新エネルギーの普及については、社会経済的慣性が大きいほど、また Learning by Doing の度合いが大きいほど、より速やかに化石エネルギーから新エネルギーに転換することが望ましいという計算結果が得られた。現実を鑑みると、上述の通り社会経済的慣性は大きいと考えられるが、Learning by Doing の度合いに不明な部分があるため、21世紀初頭からの速やかな新エネルギー普及が望ましいかどうかについては結論が出せない。しかし、仮に Learning by Doing の度合いが大きいとすると、21世紀初頭においては、社会経済的慣性によるコスト増加にさほど影響されずに低コストで新エネルギー普及とCO₂排出削減が出来ると言える。以上により、新エネルギーの普及については、Learning by Doing の度合いが政策を考える上で重要であると結論出来る。

5. 結 言

ロジスティック曲線を組み込んだラムゼーモデルを用い、新エネルギー普及に関わるパラメータの変化がCO₂排出削減の経路にどのような影響を及ぼすか、シミュレーション計算を行った。新エネルギー普及は、ロジスティック曲線と Learning by Doing を組み合わせてモデル化し、社会経済的慣性と Learning by Doing の度合いに注目して4種類の将来シナリオを設定した。

CO₂排出削減経路について、社会経済的慣性が小さく同時に Learning by Doing の度合いが大きいシナリオ以外においては、21世紀初頭からコンスタントにCO₂排出削減量を増やしていくのが望ましいという計算結果が得られた。新エネルギーの普及については、社会経済的慣性が大きいほど、また Learning by Doing の度合いが大きいほど、より速やかに新エネルギーに転換することが望ま

しいという計算結果が得られた。政策を考える上では Learning by Doing の度合いが重要なポイントであり、Learning by Doing の度合いが大きければ、21世紀初頭においては、低コストでの新エネルギー普及とCO₂排出削減が可能となる。

References

1. B.C.C. van der Zwaan, R. Gerlagh, G. Klaassen, L. Schratzenholzer: *Energy Economics*, **24**, pp.1-19 (2002)
2. R. Gerlagh, B.C.C. van der Zwaan: *The Energy Journal*, **27**, 3, pp.25-48 (2006)
3. D. Popp: *Energy Economics*, **28**, 2, pp.188-222 (2006)
4. V. Bosetti, C. Carraro, R. Massetti: *Energy Economics*, **30**, 6, pp.2912-2929 (2008)
5. K. Hatase: *Mita Journal of Economics*, **100**, 3, pp.151-164 (2007)
6. W.D. Nordhaus: *Science*, **258**, pp.1315-1319 (1992)
7. A. Manne, R. Richels, R. Mendelson: *Energy Policy*, **23**, 1, pp.17-34 (1995)
8. A. Romeo: *Economica*, **44**, pp.63-69 (1977)
9. K.J. Arrow: *Review of Economic Studies*, **29**, pp.155-173 (1962)
10. M. Grubb: *Energy Policy*, **25**, 2, pp.159-172 (1997)
11. D. Anderson, S. Winne: *Tyndall Centre Working Paper*, No.59, pp.1-66 (2004)
12. W.D. Nordhaus, J. Boyer: *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, MIT Press (Cambridge Mass.), pp. ii-244 (2000)
13. J.A. Taylor, J. Lloyd, G. Farquhar: *CDIAC DB-1009*, Oak Ridge National Laboratory (1995)
14. A. McDonald, L. Schratzenholzer: *Energy Policy*, **29**, 4, pp.255-261 (2001)