

平成23年度

環境研究総合推進費補助金 研究事業

総合研究報告書

一般廃棄物焼却飛灰, 家畜骨粉のリン酸カルシウムハイドロゲルへの
再資源化と燃料電池への利用
(K22034, K2315)

平成24年3月

広島大学大学院工学研究科 化学工学専攻
福井国博
吉田英人
山本徹也

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業（平成22年度～平成23年度）

所 轄 環境省

国庫補助金 18,742,000 円

研究課題名 一般廃棄物焼却飛灰、家畜骨粉のリン酸カルシウムハイドロゲルへの再資源化と燃料電池への利用

研究期間 平成22年4月1日～平成24年3月31日

代表研究者名 福井 国博（広島大学）

共同研究者名 吉田 英人（広島大学）
山本 徹也（広島大学）

本論文に関する学会発表

研究成果を以下に示す形式で学外に報告した。

第3回 中四国若手 CE 合宿

開催期間：2009年8月6日(木)、7日(金)

開催場所：かんぽの宿 徳島

発表者名：川越秀平、福井国博、山本徹也、吉田英人

発表題目：家畜骨粉の高プロトン電導性材料への再資源化法とその利用

発表形式：ポスター発表

予稿集：p 41(2009)

化学工学会 第41回秋季大会

開催期間：2009年9月16日(水)～18日(金)

開催場所：広島大学 東広島キャンパス

発表者名：川越秀平、福井国博、山本徹也、吉田英人

発表題目：家畜骨粉の高プロトン電導性材料への再資源化法とその利用

発表形式：口頭発表

予稿集：p 402(2009)

第3回 化学工学3支部合同徳島大会

開催期間：2010年10月23日(木)、24日(日)

開催場所：徳島大学 常三島キャンパス

発表者名：川越秀平、福井国博、山本徹也、吉田英人

発表題目：家畜骨粉のリン酸カルシウムハイドロゲルへの再資源化法の開発

発表形式：口頭発表

予稿集：p 98(2010)

粉体工学会 2011年度春期研究発表会

開催期間：2011年5月24日(火)、25日(水)

開催場所：総評会館 東京

発表者名：西田幸生、川越秀平、福井国博、山本徹也、吉田英人

発表題目：家畜骨粉のリン酸カルシウムハイドロゲルへの再資源化法の開発

発表形式：口頭発表

予稿集：p 5(2011)

第4回 化学工学3支部合同福井大会

開催期間：2011年12月8日(木)、9日(金)

開催場所：ホテルフジタ福井 福井

発表者名：西田幸生、川越秀平、福井国博、山本徹也、吉田英人

発表題目：一般廃棄物焼却飛灰のリン酸Caハイドロゲルへの再資源化

発表形式：口頭発表

予稿集：p 135(2011)

第4回 化学工学3支部合同福井大会

開催期間：2011年12月8日(木)、9日(金)

開催場所：ホテルフジタ福井 福井

発表者名：福井国博、川越秀平、山本徹也、吉田英人

発表題目：家畜骨粉のリン酸Caハイドロゲルへの再資源化と燃料電池への利用

発表形式：口頭発表(依頼講演)

予稿集：p30(2011)

第14回 化学工学会学生発表会宇部大会

開催期間：2012年3月3日(土)

開催場所：宇部工業高等専門学校 山口

発表者名：山本航平、福井国博、西田幸生、山本徹也、吉田英人

発表題目：一般廃棄物焼却飛灰のリン酸Caハイドロゲルへの再資源化とその利用

目次

目次	1
第1章 序論	8
1.1 一般廃棄物の再資源化	8
1.1.1 大量廃棄型社会と最終処分場の不足	8
1.1.2 家畜骨粉の処理法	10
1.1.3 一般廃棄物の焼却により生じる飛灰の利用	11
1.1.5 循環型社会形成の推進と循環型社会形成推進基本計画	12
1.1.4 ダイオキシンとは	12
1.1.5 循環型社会形成推進基本計画の今後の課題	13
1.2 エネルギー問題	14
1.2.1 資源の枯渇化・価格の高騰	14
1.2.2 地球温暖化	14
1.2.3 日本の温室効果ガス排出量	15
1.2.4 地球温暖化対策 ¹³⁾	16
1.3 燃料電池	17
1.3.1 次世代エネルギーとして期待される燃料電池	17
1.3.2 燃料電池の原理 ⁸⁾	17
1.3.3 分散型発電とコージェネレーション・システム ¹⁰⁾	20
1.3.4 燃料電池の種類 ¹¹⁾⁻¹³⁾	21
1.3.5 燃料電池の現状と課題	21
1.4 リン酸カルシウムハイドロゲル	23
1.4.1 コロイド粒子とゾル	23
1.4.2 ゲルとゾルの違い	24
1.4.3 高分子ゲル ^{20),21)}	24
1.4.4 リン酸カルシウムハイドロゲル	24
1.5 本研究の目的と概要	25
1.5.1 既往の研究と課題	25
1.5.2 本研究の目的	26

1.5.3	研究概要	28
1.6	References	29
第 2 章	測定機器	32
2.1	レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置	32
2.1.1	装置の名称、メーカー、製造年	32
2.1.2	装置の目的と原理、データ処理方法	32
2.2	X線光電子分光装置	35
2.2.1	装置の名称、メーカー、製造年	35
2.2.2	装置の目的と原理、データ処理方法	35
2.3	粉末 X 線回折装置	38
2.3.1	装置の名称、メーカー、製造年	38
2.3.2	装置の目的と原理、データ処理方法	38
2.4	ケミカルインピーダンスメータ	40
2.4.1	装置の名称、メーカー、製造年	40
2.4.2	装置の目的と原理、データ処理方法	40
2.5	電子負荷装置	42
2.5.1	装置の名称、メーカー、製造年	42
2.5.2	装置の目的と原理、データ処理方法	42
2.6	コーンプレート型デジタル粘度計	43
2.6.1	装置の名称、メーカー、製造年	43
2.6.2	装置の目的と原理、データ処理方法	43
2.7	原子間力顕微鏡	45
2.7.1	装置の名称、メーカー、製造年	45
2.7.2	装置の目的と原理、データ処理方法	45
2.8	スピンドル	46
2.8.1	装置の名称、メーカー、製造年	46
2.8.2	装置の目的と原理、データ処理方法	46
2.9	フーリエ変換赤外分光光度計	47
2.9.1	装置の名称、メーカー、製造年	47
2.9.2	装置の目的と原理、データ処理方法	47
2.10	References	48
第 3 章	リン酸カルシウムハイドロゲルの創製法	49

3.1	原料粉体の分析	49
3.2	従来のリン酸カルシウムハイドロゲルの創製法	51
3.3	リン酸カルシウムガラスの粉砕特性の検討	52
3.3.1	実験方法	52
3.1.2	実験結果と考察	52
3.4	References	53
第4章 従来法で創製したハイドロゲルの電気的特性		54
4.1	抵抗測定用セルの改良	54
4.1.1	抵抗測定用セル改良の経緯	54
4.1.2	抵抗測定用セルの改良	54
4.2	抵抗測定用セルの密閉性が電導率に及ぼす影響	55
4.2.1	実験方法	55
4.2.2	電導率測定条件の補足	56
4.2.3	実験結果と考察	56
4.2.4	結晶性と電導率の関係	58
4.3	昇温時と降温時の電導率の挙動の比較	60
4.3.1	実験方法	60
4.3.2	実験結果と考察	60
4.3.3	新規の追加処理の可能性	62
4.4	References	63
第5章 追加的な結晶化処理が電気的特性に及ぼす影響		64
5.1	追加処理の概要	64
5.1.1	追加処理装置	64
5.1.2	追加処理のパラメータ	65
5.2	追加処理の適切な水分量の決定	66
5.2.1	適切な水分量	66
5.2.2	適切な水分量の予測	66
5.2.3	容積絶対湿度の不確かさの推定と不確かさを減少させる方法	68
5.2.4	実験方法	69
5.2.5	実験結果と考察	70
5.3	追加処理の温度が電気的特性に及ぼす影響	71
5.3.1	実験方法	71

5.3.2	実験結果と考察	71
5.4	追加処理の圧力が電気的特性に及ぼす影響	72
5.4.1	実験方法	72
5.4.2	実験結果と考察	73
5.5	飽和蒸気圧下での追加処理が電気的特性に及ぼす影響	73
5.5.1	実験方法	73
5.5.2	実験結果と考察	74
5.5.3	リン酸カルシウムハイドロゲルの粘性と MEA の性能	75
5.6	References	78
第 6 章	リン酸カルシウムハイドロゲル創製プロセスの簡素化	79
6.1	創製プロセスの簡素化の経緯	79
6.1.1	従来のリン酸カルシウムハイドロゲル創製プロセスの課題	79
6.1.2	追加的な結晶化処理の課題	80
6.1.3	新規の結晶化処理法の提案	83
6.2	抵抗測定用セルの改良	86
6.2.1	抵抗測定用セル改良の経緯	86
6.2.2	抵抗測定用セルの改良	86
6.2.3	抵抗測定用セルの改良の補足	87
6.3	新規の結晶化処理法	88
6.3.1	実験方法	88
6.3.2	実験結果と考察	89
6.3.3	補足	96
6.4	References	98
第 7 章	粗大な結晶粒子の分析と粘性変化の考察	99
7.1	粗大な結晶粒子の分析	99
7.1.1	実験方法	99
7.1.2	実験結果と考察	100
7.2	粘性変化の考察	105
7.2.1	実験方法	105
7.2.2	実験結果と考察	106
7.3	総合的な考察	110
7.3.1	粗大な結晶粒子の析出について	110

7.3.2	粘性変化の総合的考察	111
7.4	References	112
第 8 章	家畜骨粉から合成したゲルの発電特性	113
8.1	燃料電池セルの構成	113
8.1.1	燃料電池セルの構成	113
8.1.2	MEA の補足	114
8.2	常温での発電特性	115
8.2.1	実験方法	115
8.2.2	実験結果と考察	116
8.3	噴霧器の形式と選定 ¹⁾	118
8.3.1	湿度保持と噴霧器	118
8.3.2	加圧噴霧器	118
8.3.3	空気による霧化	119
8.3.4	ロータリーアトマイザー	120
8.3.5	超音波噴霧器	121
8.3.6	静電噴霧器	122
8.3.7	噴霧器の選定	123
8.4	発電特性の温度依存性	123
8.4.1	実験方法	123
8.4.2	実験結果と考察	124
8.5	References	127
第 9 章	リン酸カルシウムガラス作製法の簡素化	128
9.1	リン酸カルシウムガラスの合成法	128
9.1.1	原料粉体	128
9.1.1	従来のリン酸カルシウムガラス粉末作製法	129
9.1.2	新規のリン酸カルシウムガラス粉末作製法	131
9.2	実験結果	133
9.2.1	回収した生成物の結晶性評価	133
9.2.2	作製したリン酸カルシウムガラス粉末の粒子径比較	134
9.2.3	作製したリン酸カルシウムガラス粉末の形状比較	134
第 10 章	リン酸カルシウムハイドロゲルへの合成	136
10.1	実験方法	136

10.1.1	リン酸カルシウムハイドロゲルの合成方法	136
10.2	実験結果	136
10.2.1	合成したリン酸カルシウムハイドロゲルの結晶構造	136
10.2.2	合成したリン酸カルシウムハイドロゲルの粘性	137
第 11 章	焼却飛灰への前処理による再資源化への影響	140
11.1	焼却飛灰に含まれる物質の影響	140
11.2	前処理およびリン酸添加比による影響	140
11.2.1	実験方法	140
10.2.2	実験結果と考察	141
第 12 章	ハイドロゲルの塗布方法の改良	148
12.1	スピンコーターによる塗布	148
12.1.1	実験方法	148
12.1.2	実験結果及び考察	148
第 13 章	結晶化処理に影響を与える原因の究明	151
13.1	リン酸カルシウムガラス粉末の粒子径が結晶化処理に与える影響	151
13.2	リン酸カルシウムガラス粉末の親水性が結晶化処理に与える影響	152
13.2.1	実験方法	152
13.2.2	実験結果と考察	152
第 14 章	リン酸カルシウムハイドロゲル合成の改良	154
14.1	攪拌を併用した結晶化処理による合成方法	154
14.1.1	実験方法	154
14.1.2	実験結果	154
14.2	粉碎処理を追加する影響	155
14.2.1	実験方法	155
14.2.2	実験結果	155
14.3	水との親和性の考察	159
14.3.1	実験方法	159
14.3.2	実験結果及び考察	159
14.4	ハイドロゲルの水の保持力に関する考察	161
14.4.1	実験方法	161
14.4.2	実験結果及び考察	162

14.5	新規法で作製したガラス粉末における結晶化処理の時間依存性	166
14.5.1	実験方法	166
14.5.2	実験結果	166
14.6	新規法で作製したガラス粉末における結晶化処理の温度依存性	168
14.6.1	実験方法	168
14.6.2	実験結果	168
14.7	考察	169
第 15 章	焼却飛灰から合成したゲルの発電特性	171
15.1	燃料電池セルの構成	171
15.2	常温での発電特性	171
15.2.1	実験方法	171
15.2.2	実験結果	171
15.2.3	考察	172
15.3	発電特性の温度依存性	173
15.3.1	実験方法	173
15.3.2	実験結果	173
第 16 章	結論	178

第1章 序論

1.1 一般廃棄物の再資源化

1.1.1 大量廃棄型社会と最終処分場の不足

産業革命を端に発し、20世紀に高度に展開した大量生産・大量消費型の社会構造は、私たち人類の生活を豊かにし、経済力を向上させた。その反面、大量廃棄型の社会を形成し、環境保全と健全な物質循環の阻害をもたらした。

Fig.1.1 に各年度における一般廃棄物の処理量及び焼却量とリサイクル率を示す。

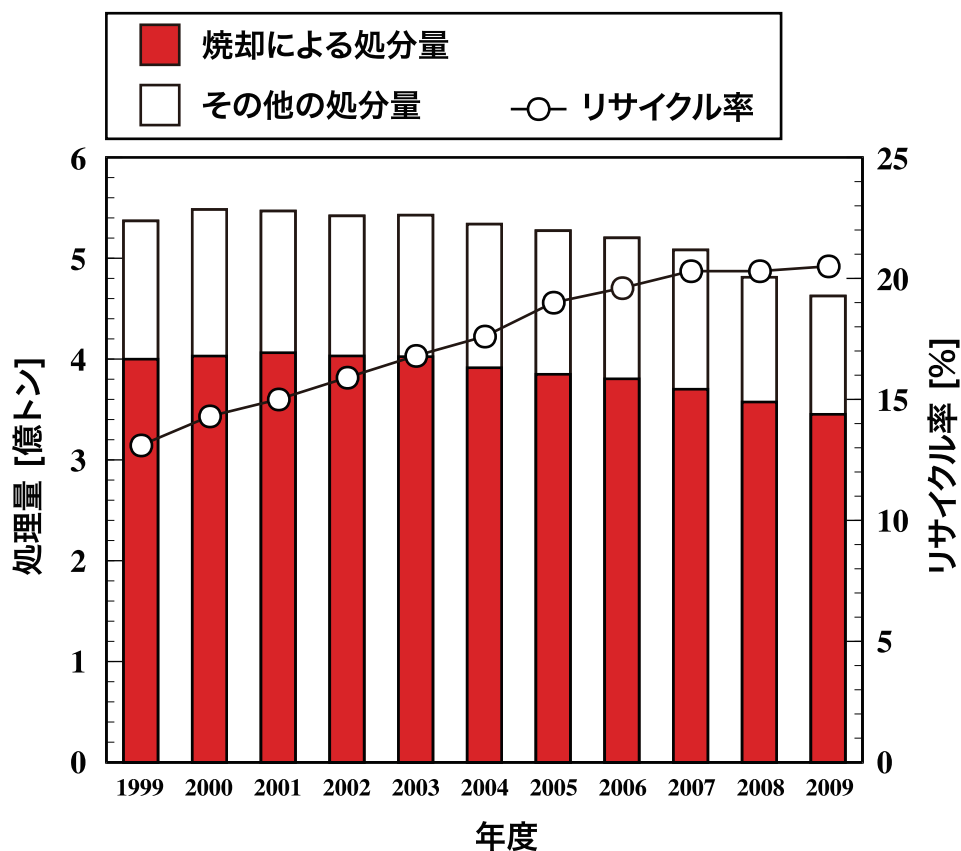


Fig.1.1 一般廃棄物処理量の推移

まず一般廃棄物とは、産業廃棄物以外の廃棄物をいい、ごみの他にもし尿も含んでいる。主に過程から発生する生活系廃棄物が主体であるが、事務所や飲食店から出る事業系のごみも一部含んでいる。これらの中で、爆発性、毒性、感染性、その他の人の健康または生活環境に係る被害を生じるおそれがあるものを特別管理一般廃棄物として区別している。

日本の一般廃棄物の処理量は1999年度から2003年度まで5億トンを超えていたが、2004年度から処理量が減少し始め、2008年度以降は、処理量が5億ト

ンを下回っている。しかし、1986年度の一般廃棄物の年間排出量が4300億トンであってことをふまえると、依然として日本の社会構造は、大量廃棄型であるといえる。また、ごみは、無害化処理やさらに資源利用することが望まれる。各年度の一般廃棄物のリサイクル率は、2007年度に20%を超えて以降、その数値を維持しており、まだまだ再資源化の取り組みが進んでいるとはいえない。各年度の処理方法においては、焼却処理による中間処理の比率がおよそ80%と高くなっている。

また、一般廃棄物の年間排出量は現状維持程度にもかかわらず、新規の最終処分場建設数が急激に減少しているため、最終処分場の不足が問題となっている。Fig.1.2に最終処分場の残余容量と残余年数の推移を示す^{1),3)}。近年、最終処分場の残余年数は増加しているものの、残余容量はひっ迫しており、深刻な状況と言える。また、経済成長が著しいアジア地域を始めとする途上国においても廃棄物問題が深刻化しつつある。Fig.1.3に示すように世界の廃棄物発生量は2050年には2000年の2倍以上になるという試算もある。それらとともに、廃棄物等の多様化に伴う処理の困難化や不適正な処理による環境負荷が増大している。

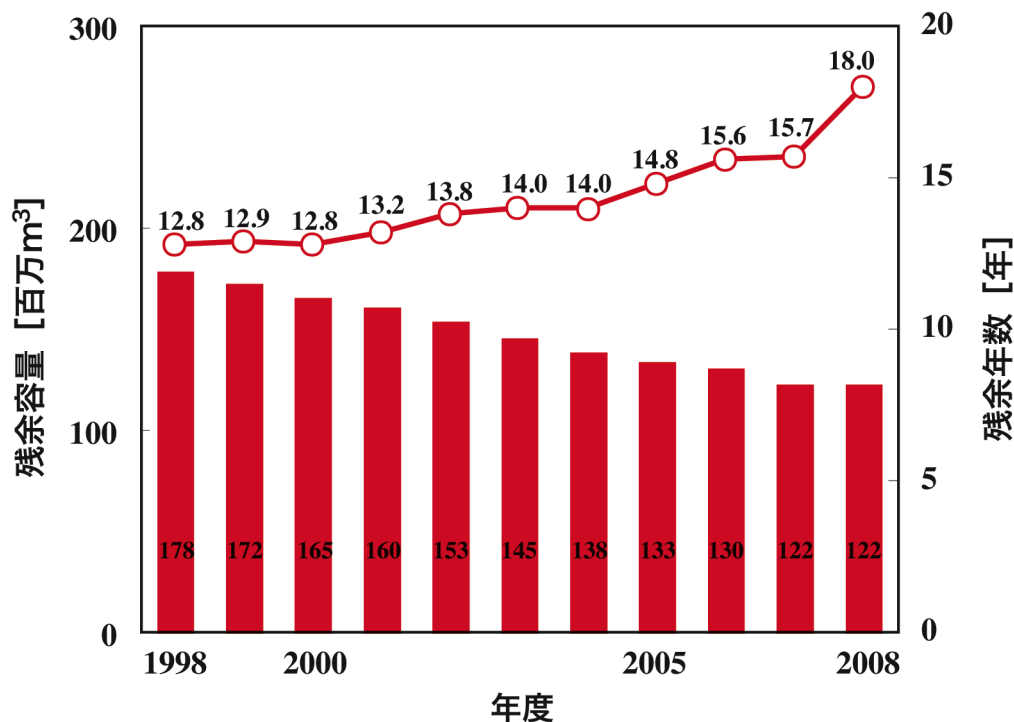


Fig.1.2 最終処分場の残余容量と残余年数の推移

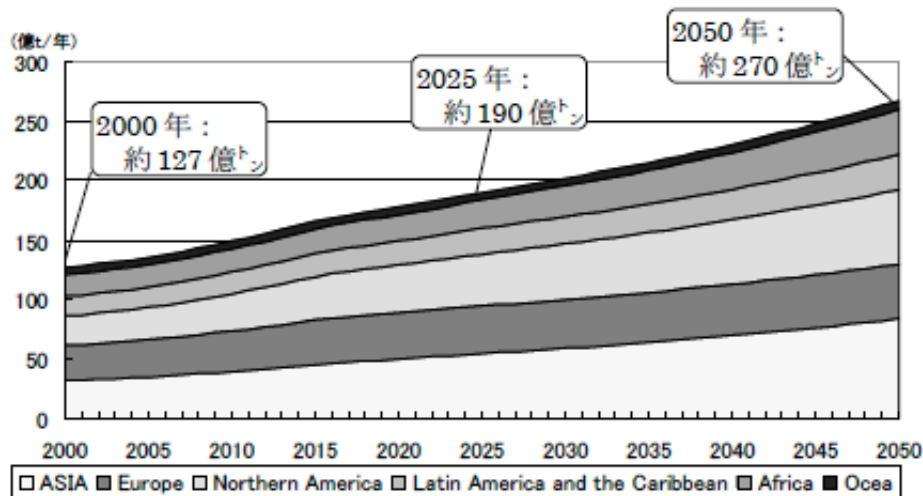


Fig.1.3 世界の地域別廃棄物発生量(2000-2050)⁴⁾

1.1.2 家畜骨粉の処理法

動植物性残渣は廃棄物全体に占める割合は低く 0.7 wt% である⁵⁾。しかし、動植物性残渣は、食品製造業など特定の業種の製造工程から排出される廃棄物であるため、人類が生活を営み続ける限り排出され続ける廃棄物である。また、人口の増加とともに排出量が増加する廃棄物でもある。日本は人口が減少傾向にあるものの、世界に目を向ければ、東南アジアの経済成長に伴う人口の増加は著しい。そのため、動植物性残渣の処分法の確立は大変重要である。

現在、家畜骨粉は肥料へ再資源化されるものもあるが、その再資源化率は高くなく、多くは埋め立てなどの最終処分をされる。Table 1.1 に示すように、近年、様々な企業が家畜骨粉（廃肉骨粉）の新たな再資源化方法として、セメントの原料に利用する方法やプロセス、システム体系を構築しようと試みている。しかし、まだまだ課題も多く、また、付加価値が高い再資源化方法とは言えない。

Table 1.1 産業廃棄物再生利用認定制度の認定状況⁶⁾

認定年月日	認定を受けた者	再生の方法	施設所在地
2004/11/26	東ソー株式会社	廃肉骨粉（化製場から排出されるものに限る。）に含まれるカルシウムをセメントの原料として使用する。	山口県
2004/12/3	住友大阪セメント株式会社岐阜工場	廃肉骨粉（化製場から排出されるものに限る。）に含まれるカルシウムをセメントの原料として使用する。	岐阜県
2005/1/25	琉球セメント株式会社	廃肉骨粉（化製場から排出されるものに限る。）に含まれるカルシウムをセメントの原料として使用する。	沖縄県
2005/3/10	三菱マテリアル株式会社横瀬工場	廃肉骨粉（化製場から排出されるものに限る。）に含まれるカルシウムをセメントの原料として使用する。	埼玉県
2010/10/28	太平洋セメント株式会社熊谷工場	廃肉骨粉に含まれるカルシウムをセメントの原材料として使用	埼玉県

1.1.3 一般廃棄物の焼却により生じる飛灰の利用

一般に、ごみの処理・処分といった場合には、処理とは中間的な処理を指し、処分とは最終埋め立て処分を意味することが多い。中間処理の目的は、多岐にわたるが、減容化、無害化、無臭化、資源化、エネルギーの有効利用などになる。日本では、欧米諸国に比べて焼却処理の比率が高いことが特徴で、一般廃棄物の処理方法では、焼却処理が最も一般的な方法である。病原菌や腐敗物の無害化ができるほか、発電、給湯、冷暖房などの熱利用が行えることが焼却処

理の大きな特長である。方式としては、ストーカ方式とガス化溶融炉方式に大別できる。前者は、歴史が古く施設数も圧倒的に多い。後者は、灰溶融との一体化や資源化に有効であり、近年採用されることが多くなっている。Fig.1.4 にストーカ方式の略図を示す。

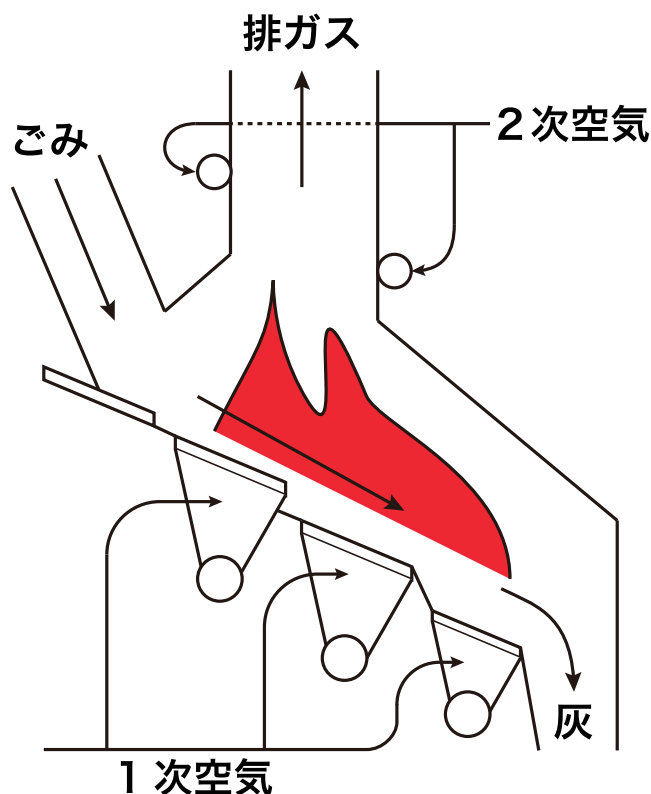


Fig.1.4 ストーカ方式の略図

一般廃棄物の処分方法の多くが焼却によるものあり、これにより大量の灰が排出される。しかし、一般廃棄物の焼却後に生じる焼却飛灰には、ダイオキシンが多く含まれているため、ダイオキシンの大気中への流出を大量の消石灰を散布することで未然に防いでいる。故に、焼却飛灰にはカルシウム成分を多く含んでいる。焼却飛灰の処理に多大な出費を払わされながら、そのほとんどが埋め立て処分されており、焼却飛灰の再資源化が推進されていた。近年では、セメント材料へ再資源化がなされているが、付加価値が低く、さらなる高付加価値の材料への転換が望まれている。

1.1.4 循環型社会形成の推進と循環型社会形成推進基本計画

循環型社会^{7),8)}とは、生産、流通、消費、廃棄および自然の資源を採取することなどの社会経済活動の全段階を通じて、廃棄物等の発生抑制や循環資源の利

用などの取組により、新たに採取する資源をできるだけ少なくした、環境への負荷をできる限り少なくする社会のことである。上記したように、今日、環境保全は、人類の生存基盤にかかわる極めて重要な課題である。また、経済活動のグローバル化に伴って国際的な相互依存は日常生活の様々な分野にまで及んでいる。世界的に資源制約が顕在化し、循環資源の価値が高騰する昨今において、資源に乏しい日本は、国際的に連携をとり、国際社会と協力し合いながら循環型社会の形成を図っていく必要性がますます高まっている。

循環型社会形成推進基本計画は、循環型社会形成推進基本法第15条の規定に基づいた「持続可能な社会」を創り上げるための基本的な計画である。環境の保全を前提とし、3Rの推進と適正処理の実施など、循環型社会の形成推進に当たって常に持続可能な社会の構築に向けた視点を持ち、低炭素社会に向けた取組や自然共生社会に向けた取組と統合した取組を進めることを重要項目としている。2002年9月のヨハネスブルグ・サミット実施計画に基づき各国が策定する持続可能な生産・消費形態への転換を加速するための10年間の枠組みとして2003年に第1次循環基本計画が定められ、同計画に基づく取組が進められてきた。第2次循環基本計画は、第1次循環基本計画を引き継ぎ、ヨハネスブルグ・サミット実施計画に基づく計画として位置づけられる。

1.1.5 循環型社会形成推進基本計画の今後の課題

循環型社会の形成に向けて、地域の活力を引き出しつつ、新たなライフスタイルやビジネススタイルにより環境と経済の好循環を実現していくことが重要である。また、「3R(Reduce, Reuse, Recycle)」に関する安心を確保しつつ、3R技術やシステムをさらに高度化し、情報や人材を含めて、国内の基盤を充実させていく必要がある。このため、具体的には以下の課題に対応することが求められる。

- (1) 地域コミュニティの再生などを通じた地域循環圏の構築
- (2) 100年後の世代にも伝えられるライフスタイル
- (3) 環境と経済の好循環を実現するビジネススタイル
- (4) 発生抑制を主眼とした3Rの更なる推進と適正処理の確保
- (5) 3Rの技術とシステムの高度化
- (6) 情報の的確な把握・提供と人材育成
- (7) 国際的な循環型社会の構築

1.2 エネルギー問題

1.2.1 資源の枯渇化・価格の高騰

世界経済の発展とともに、化石燃料の消費が増加しており、2030年には世界のエネルギー消費量は現在の1.4倍に達する見込み⁹⁾であり、その増加分の約半分はアジアによるものとされている。今後、先進国はもとより、BRICs（ブラジル、ロシア、インド、中国）が経済成長を続けていけば、石油や石炭、天然ガスといった化石燃料の需要がますます大きくなると予想されている。一方、世界のエネルギー可採年数は石炭が122年、石油は42年、天然ガスは60年、ウラン100年とされている⁹⁾。

また、近年、歴史的な原油価格の高騰が続いている。Fig.1.4に示すように、2002年の年初には1バレル20ドル前後であった原油価格は、2007年度末には5倍以上に上昇し、110ドル台に到達した。このような原油価格の高騰は、世界のエネルギー情勢の変化に大きく影響しており、国内に資源の乏しい日本において、エネルギー資源の枯渇化は深刻な問題である。

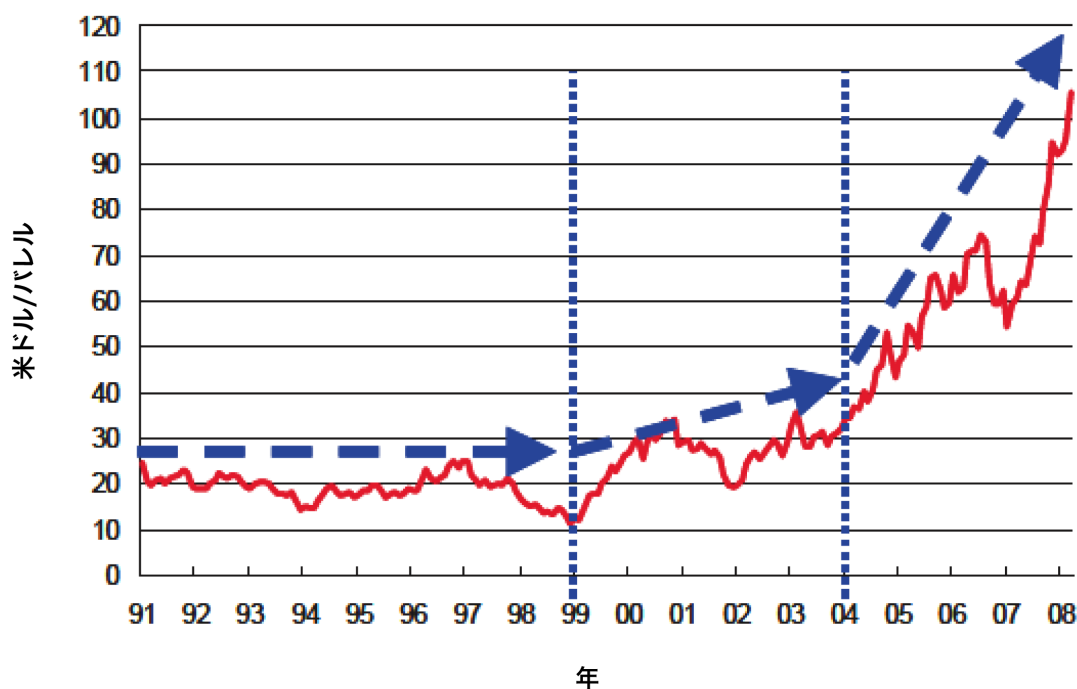


Fig.1.5 ニューヨーク原油先物市場の推移¹⁰⁾

1.2.2 地球温暖化

20世紀は科学技術の進歩が経済発展をもたらした輝かしい世紀であった。しかし、20世紀後半には地球規模の環境問題が認識されるようになった。地球温

暖化は、環境問題の中でももっとも解決が難しい問題の1つである。それはエネルギーを使う人間活動のほとんどすべてが原因だからである。そして、その影響は先進国や途上国といった区別なく、私たちの世代より後の世代に現れるため、時代をも地域をも越える大きな問題と言える。

この100年間に地球の平均気温は0.74°C上昇し、日本の平均気温は約1.1°C上昇したことが明らかになっている¹¹⁾。さらに、東京や大阪などの大都市では、ヒートアイランド現象も加わり、2~3°Cの上昇が観測されている。このような気温の上昇によって、様々な現象が現れ始めている。その一例として、成層圏の温度の低下（成層圏下部で1979年以降、10年当たり0.3~0.6°C低下）、氷河の融解、北極海の海氷の厚さが減少し、氷覆面積が減少、南極の棚氷の崩壊、この100年間に地球の平均海面水位が17cm上昇などの現象が観測されていることが挙げられる。降水においても、1900年以降、北半球の中・高緯度で降水量が5~10%増加し、亜熱帯では3%減少、熱帯では2~3%増加した。上記の兆候は、単に地球温暖化による長期にわたる気候の変化でなく、短期的な気候変化や異常気象と捉えることもできる。しかし、温度計などの機器での観測データはわずか140年分しかなく、また、異常気象の観測データはそれよりも短く、現段階では、温暖化と異常気象との関連を観測データからはっきり指摘すること難しく、世界気象機関（WMO）も、「温暖化と関連があるかどうかは、現段階でははっきり答えられない」という見解を示している。

しかし、地球温暖化が進むと極端な気象現象が現れる傾向があるのは事実であり、世界レベルでの対策が急がれている

1.2.3 日本の温室効果ガス排出量

地球は大気層に覆われていて、地上の多くの生物が大気層の存在によってその生命を維持している。また、大気に含まれる水蒸気、二酸化炭素、メタン、フロンなどの温室効果ガスの存在も、地球上の気候を生物の生息に役立っている。それは、温室効果ガスは地球の適度に保つ重要な役割を果たしているからである。現在、地球全体の平均気温は約14°Cに保たれているが、温室効果ガスが全くなかった場合、平均気温は-19°Cの極寒の天体であったと推定され、人類の繁栄の可能性は皆無に等しいと考えられる。

しかし、温室効果ガス排出量が増加し続けると生態系に悪影響を及ぼす。

Fig.1.6に日本の温室効果ガス排出量の経年変化を示す。2008年度の日本の二酸化

炭素排出量は12億1400万トンであり、前年度より6.6%減少している。しかし、前年度と比べて排出量が減少した原因は、金融危機の影響による年度後半の急激な景気後退に伴う、産業部門をはじめとする各部門のエネルギー需要の減少などが大きい⁹⁾。また、基準年（二酸化炭素、メタン、一酸化炭素は1990年度、ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄は1995年度）と比べると、6.1%増加している。このため、温室効果ガス削減の取り組みを今後も継続的に行う必要がある。さらに、温室効果ガス排出量を抑制するには、二酸化炭素の排出量を減少させることが最も効果的であることが分かる。

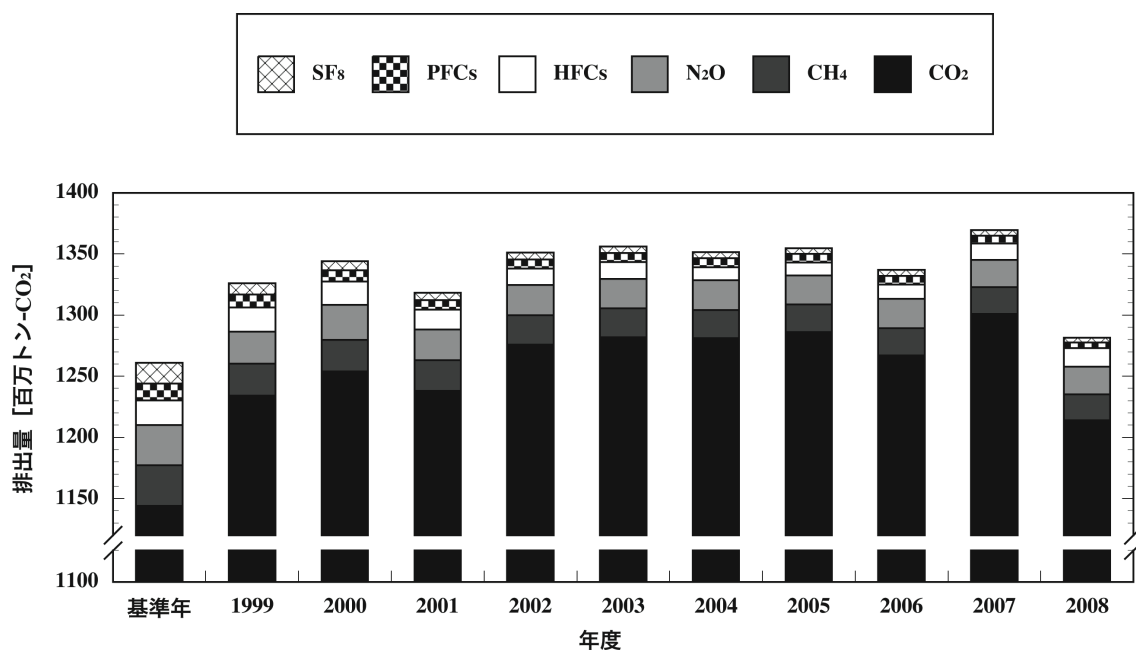


Fig.1.6 日本の温室効果ガス排出量の経年変化¹²⁾

1.2.4 地球温暖化対策¹³⁾

1992年に世界各国が、国連の下、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極の目標とする国連気候変動枠組条約（United Nations Framework Convention on Climate Change）を採択し、地球温暖化対策に世界全体で取り組んでいくことに合意した。同条約に基づき、1995年から毎年、気候変動枠組条約締約国会議（COP）が開催されている。また、1997年に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）では、先進国の削減目標（2008年～2012年の5年間で1990年に比べて日本6%、米国7%、EU8%の削減等々）を明確

に規定した京都議定書¹⁴⁾（気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書、Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change）に合意することに成功し、世界全体での温室効果ガス排出削減の大きな一歩を踏み出した。

2002年に日本も京都議定書を締結し、2005年2月に発効された。今後、更に地球温暖化対策を加速化し、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させるという条約の目標を達成するには、京都議定書の現行の約束期間が終了する2013年以降の国際枠組みを設定することが重要である。また、世界全体に占める排出量の割合が大きい米国、中国、インド等を含めた全ての主要経済国が責任ある形で参加する、公平かつ実効的な枠組みとすることが不可欠である。

1.3 燃料電池

1.3.1 次世代エネルギーとして期待される燃料電池

近年、クリーンな次世代エネルギーとして燃料電池（Fuel cell）が注目され、技術開発が活発化している¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。燃料電池は「電池」という名前がついているものの、内燃機関のイメージに近く、外部から燃料となる物質（主に水素と酸素）を送り込むことによって電気をつくる発電システムである。従来の発電システムのように熱エネルギーや運動エネルギーの過程を経ない直接発電であるので、小規模でも高い発電効率が期待できる。また、窒素酸化物などの排出が少なく、騒音や振動が少ないので環境性が良い。

燃料電池の原理の発見は意外に古く、1801年にイギリスのハンフリー・デービーが提唱し、同じくイギリスのウィリアム・グローブによって1839年に実際に燃料電池を制作され発電を証明した⁷⁾。しかし、発生した電流が非常に小さく、実用レベルになるまでには長い年月を要した。最初に実用化されたのは宇宙船であった。1969年に人類が初めて月面に降り立ったが、この時のアポロ11号の電源は燃料電池であった。以後、地上での発電に応用させるべく、様々な業界で開発が進められるようになる。

1.3.2 燃料電池の原理²⁰⁾

燃料電池の発電システムは**Fig. 1.7**に示すように電気を発生させる「燃料電池本体」を中心とし、これに水素リッチガスを供給するための燃料を水蒸気改質する「改質装置」、発生した直流電気を交流に変える「逆変換装置（インバータ）」などの周辺装置で構成される。

水素を燃料とする場合の電池の電気化学反応を以下に示す。なお、ここでは、電解質に陽イオン交換膜を用いた形式について示す。

まず、改質装置での水蒸気改質反応（天然ガス燃料の場合）は式(1.1)のようになる。



高純度になった水素を供給するアノード（Anode、負極、燃料極）での反応は式(1.2)のように表せる。



また、空気を供給するカソード（Cathode、正極、空気極）での反応は式(1.3)のようになる。



式(1.2)、(1.3)より、全体での反応は式(1.4)のように表される。



全体での反応は水素と酸素から水が生成するもので、水の電気分解の逆の反応となる。

Fig. 1.7 燃料電池発電システムの概略図

また、**Fig. 1.8** に標準状態での水生成反応のエネルギー変化を示す。水の生成反応の熱力学方程式は式(1.5)のようになる。



この反応は自発的に起こる反応であり、反応の際に外部にエネルギーを放出す

