

振興技術開発に関する調査研究 (II)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	J1360 97-001	9.6.11.
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1997年3月

株式会社テクノバ

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical
Evaluation and Patent Office Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1997

振興技術開発に関する調査研究（Ⅱ）

小奈 勝也*

要 旨

放射性廃棄物の処分に係る研究施設の立地誘発のために、昭和60年度より「ジオトピア構想」という地下環境の開発利用に関する調査研究を実施してきた。

この中では、地域との間の信頼性向上には、形の見えない計画や構想よりも地下開発利用から様々な分野への実用化が見込める技術の確立をめざす方が、技術の経済的波及効果や産業振興との関係を理解させ易く、効果的であるとの考えに至った。

超電導エレベータや温度差利用駆動モータ等の革新的技術の開発は、このような背景から着手したものである。さらに、より地域振興への貢献と科学技術への関心を高めることを目標として、平成3年よりその技術を一般市民が理解し易い模型などの「触れる」形態にする作業を実施してきており、放射性廃棄物から発生する熱を利用することを目標とした熱電変換素子（ゼーベック素子）を組込んで駆動する模型や温度差で駆動するモータ（スターリング・エンジン）等の検討を実施してきた。

今年度は、これら熱（温度差）利用を発生源に近い環境から、「上流域」、「中流域」、「下流域」を区分して、それぞれの区分に適したシステムの開発を検討した。「上流域」では、スターリング・エンジンを発電システムへ組込むことを想定したモデルの製作に関する予備検討を行った。検討に際しては、関係者からなる検討会を設置して行った。「中流域」では、ゼーベック素子による発電システムを、電池への充電を可能にするシステムを検討した。「下流域」では、様々な気体分子をファンデル・ワールス力で包含させた、いわゆる「ガス・クラスレート（気体の水和物）」の分解圧を利用した駆動システムを検討した。

一方、これまで開発してきた超電導エレベータに関しては、ユーザの期待と動燃自身の開発課題を絞り込む観点から、関係者からなる検討会を設置して検討を行った。

本報告は、株式会社テクノバが動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：080D0146

事業団担当者：衣笠 学（核燃料サイクル技術開発部 担当役）

*：株式会社テクノバ 取締役 調査研究部長

目 次

第 1 編 発電型スターリング・エンジンの製作のための予備的検討	1
第 1 章 低温度差スターリング・エンジンの開発	2
1. 1 低温度差スターリング・エンジン開発の経緯	2
1. 2 基本構想	2
1. 3 一方向性ピストン・リングの開発	3
第 2 章 低温度差スターリング・エンジン開発の予備的検討	7
2. 1 低温度差スターリング・エンジンの性能	7
2. 2 実験結果および考察	8
2. 3 小型山の神Ⅱ号の試作および試験状況	11
第 2 編 ゼーベック素子からなる給電充電システムの検討	16
第 1 章 検討の目的・背景	17
1. 1 排熱利用	17
1. 2 熱回生技術開発	17
第 2 章 ゼーベック素子からなる給電充電システムの検討	19
2. 1 回路要素	19
2. 2 熱電変換発電器	19
2. 3 性能確認試験	22
第 3 編 ガス・クラスレートを利用した駆動システムの調査	25
第 1 章 ガス・クラスレート	26
1. 1 ガス・クラスレートの一般特性	26
1. 2 メタンハイドレート	29
第 2 章 ガス・ハイドレート分解圧の評価	30
2. 1 ガス・ハイドレートの生成と分解	30
2. 2 ガス・ハイドレート分解圧による駆動力の評価	32
第 4 編 超電導エレベータの今後の開発指針の検討	35
第 1 章 超電導エレベータの開発経緯	36
1. 1 垂直搬送の歴史	36
1. 2 鉦山の技術から人員輸送へ	37
1. 3 超電導エレベータの開発	38
第 2 章 超電導エレベータの普及方策	42
2. 1 応用分野の検討会	42
2. 2 産業界で期待される応用分野	43
Appendix	49

第 1 編

発電型スターリング・エンジンの製作のための予備的検討

第1章 低温度差スターリング・エンジンの開発

1.1 低温度差スターリング・エンジン開発の経緯

低温度差スターリング・エンジンは、Ivo Korin によって開発されてから12年が経過し、ここ10年間は模型の域を脱することはなかった。しかし、自然エネルギーの有効利用の観点から低温度差スターリング・エンジンの特徴が見直され、高出力のエンジンが試作され始めている。埼玉大学では、10 W 級低温度差スターリング・エンジンの基礎研究を経て、100 W 級および 300 W 級低温度差スターリング・エンジンの研究開発が行われている。

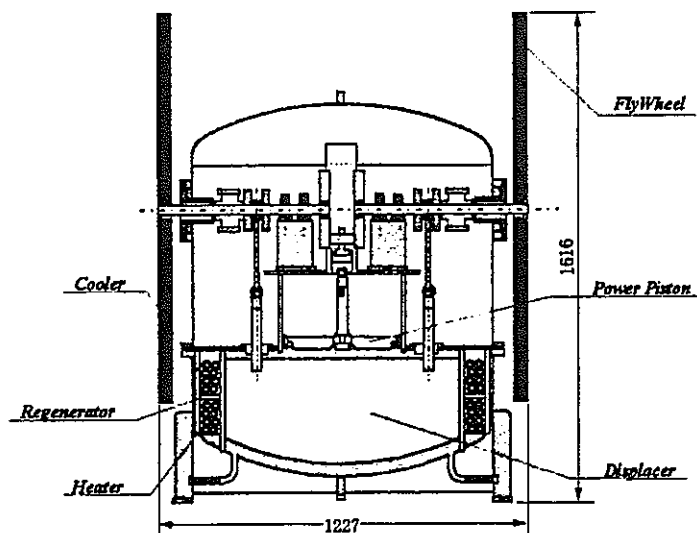


図1 低温度差スターリング・エンジン (300 W 級)

1.2 基本構想

低温度差スターリング・エンジンは、低温熱源を利用するために、高出力を得るには大形化せざるを得ない。そこで、現存の 300W 級エンジンを基本として、

- ①小型化、②流動損失の低減、③高バッファ圧力化、④熱交換器内の死容積の低減

を計るものとした。

エンジンの特徴は、まず第一にディスプレイサ・ピストンのストロークを大きくした。第二に流動損失を低減させるために、ディスプレイサ・ピストンに比べてパワーピストンの径を大きくしてある。さらにエンジンの径が小さくなったことからバッファ圧力をかなり高くすることができる。なおクランク機構は現在の方式を用いる。

1. 3 一方向性ピストン・リングの開発

(1) 一方向性ピストン・リングの特性

実際に運転可能な、低温度の熱源を利用するエンジンを製作するには、理論上の熱効率自体が低いので、ピストン・リング、軸シールなどエンジン内摺動部の摩擦抵抗、および作動ガスの流動抵抗を可能な限り小さくしなければならない。このため、一般の内燃機関や高温度差スターリング・エンジンなどで使用されているシール装置や軸受などは、そのまま低温度差スターリング・エンジンに適用することはできず、これらの要素技術は、全く発想を変えた別の観点より研究されなければならない。

そこで求められる理想的なピストン・リングの姿として、無潤滑で運転ができ、しかも漏れがゼロ、摩擦および磨耗がゼロ、という条件を具備していることがあげられる。このような条件に近づこうとすることで開発されたのが、一方向性ピストン・リングである。

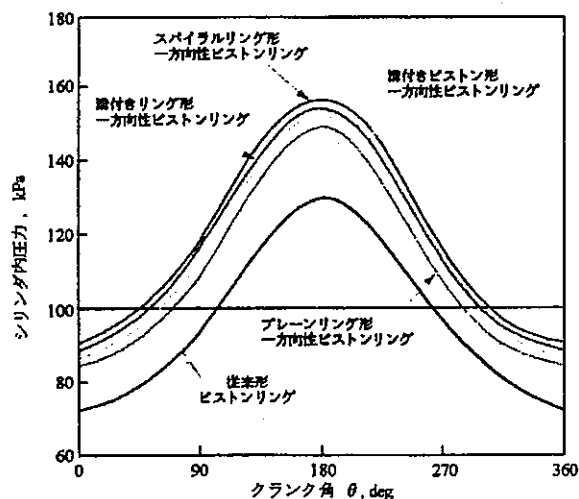


図2 各種ピストン・リングの動力漏れ試験

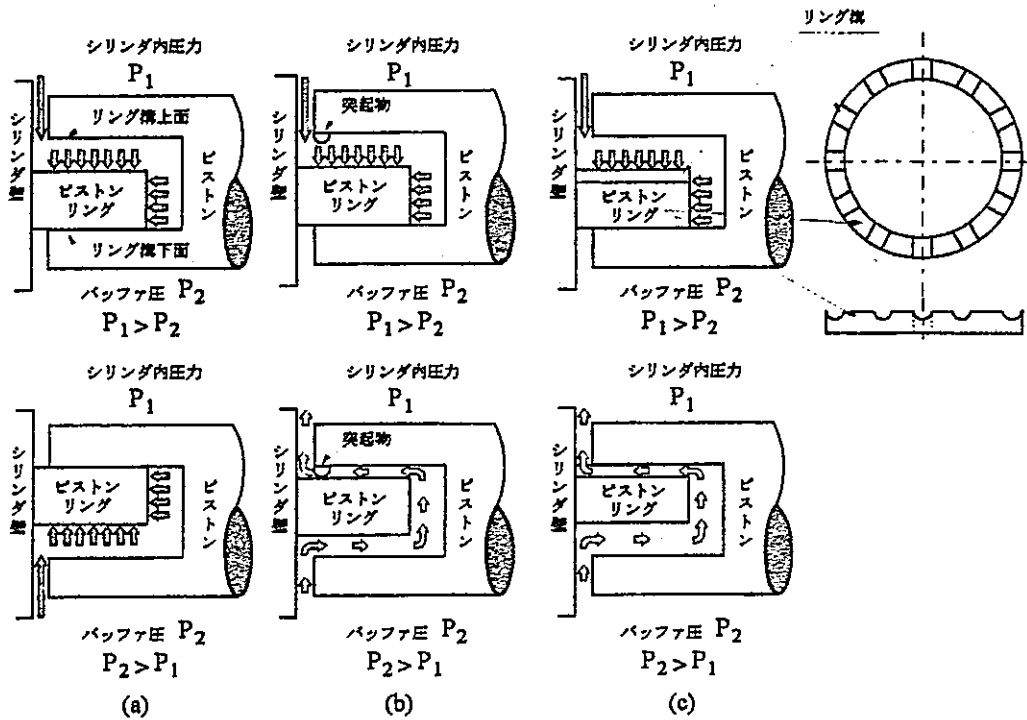


図3 一方向性ピストン・リングの基本特性

図2は、ガス漏れ試験装置によって測定されたシリンダ内圧力を、クランク角 θ に対して図示したものである。従来形ピストン・リングでは、シリンダ内の最低圧力は大気圧よりもかなり低くなり、大気圧(100 kPa)を中心に、正圧と負圧の部分はほぼ同じで2分割されている。これに反して一方向性ピストン・リングは、いずれもクランク角 θ の広い範囲にわたって正圧となっており、負圧の部分は極めて狭く、しかもシリンダ内最高圧力は、従来形のピストン・リングの場合よりも、かなり大きくなっているのがみられる。図3は一方向性ピストン・リングの基本特性である。

(2) 一方向性ピストン・リングを用いた機関の性能

各ピストン・リングを用いた場合のトルク、図示出力および軸出力の測定値と機関回転数との関係を図4に示す。トルク、図示出力および軸出力は、いずれも従来形ピストン・リングよりも一方向性ピストン・リングのほうが大きく、図示出力においては、プレーンリング形、スパイラル・リング形そして溝付リング形の順に大きくなっている。

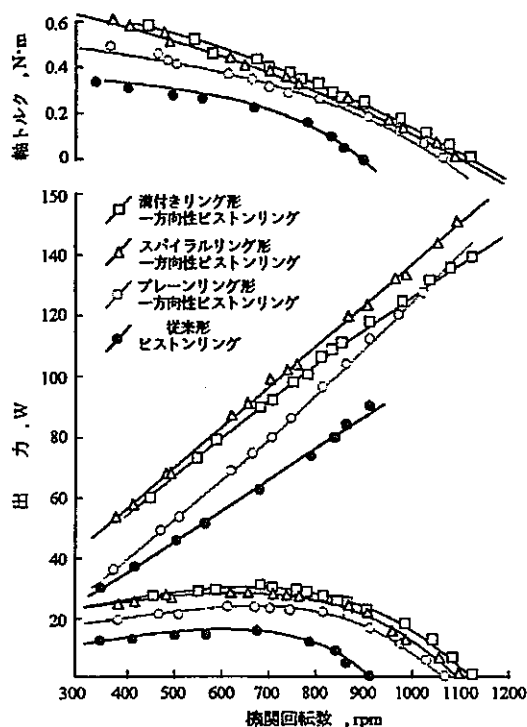


図4 一方向性ピストン・リングの機関性能

一方、軸出力ではスパイラル・リング形が最も大きく、次いでリング形、プレーン・リング形の順で小さくなっているのがみられる。これは、ピストンの往復動によるリングの摩擦損失が大きく影響しているものと考えられ、そして軸出力の向上は従来形ピストン・リングに対して、プレーン・リング形で約 1.5 倍、溝付きリング形で約 1.7 倍、スパイラル・リング形で約 2 倍増となっている。

このように、一方向性ピストン・リングは、エンジン内の摺動摩擦抵抗を著しく軽減させ、シリンダ内の平均圧力を上昇させる作用があるので、これによって出力も飛躍的に向上し、低温度差スターリング・エンジンの実用化が十分期待しうる結果が得られた。

(3) 低温度差スターリング・エンジンの熱勘定

図5に最高軸出力時の熱勘定を示す。恒温槽からの供給熱量 6 kW を 100 % とし計算してある。正味熱効率は 2.6 % と低くなっている。この原因は供給熱量の大部分がシリンダ壁等への損失であり、この損失を減少させることによって、正味熱効率を大幅に向上させることが期待できる。

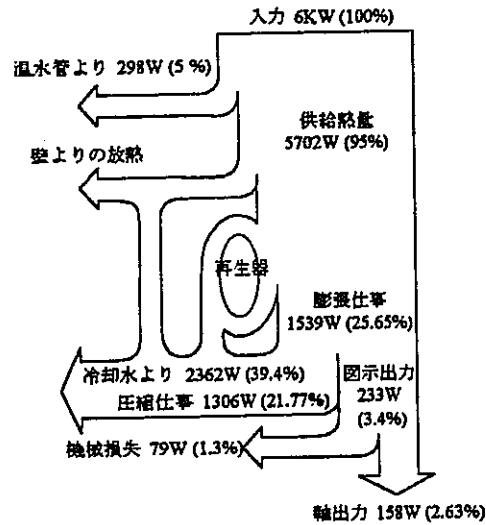


図5 最高出力時の熱勘定

(4) 改善案の提案

1) 熱交換器

現在の熱交換器はディスプレイサ・ピストンの周りに配置されている。この欠点はガス流路が長くなること、さらにシリンダ径が大きくなることである。この欠点をなくすには、熱交換器をディスプレイサー・ピストンの中に配置することが考えられる。

2) メカニカル・ロスの低減

ピストンおよび軸シールは一方向性シールを用い、バッファ圧力運転に際しては、フライ・ホイールおよび発電装置をエンジン内に挿入したハーメチック・タイプとする。

第2章 低温度差スターリング・エンジン開発の予備的検討

2.1 低温度差スターリング・エンジンの性能

低温度差スターリング・エンジンとして開発中の「山の神」は、低温度差スターリング・エンジンでは初めての試みである、バッファ・タンク加圧方式を採用していることから、バッファ圧力（ピストンの背圧）を高めることによって高出力化が可能となっている。山の神の構造とその仕様を図6、表1に示す。

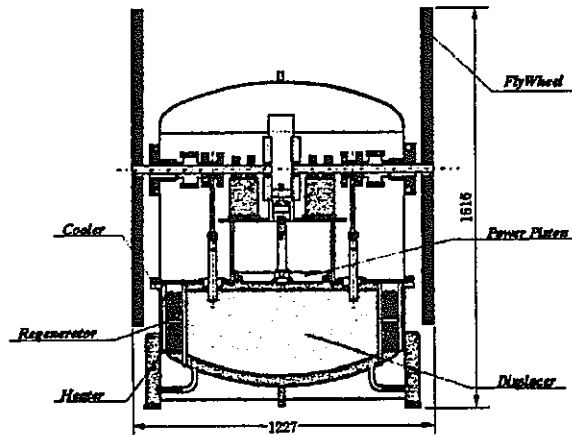


図6 山の神の構造

表1 山の神の仕様

Engine type	γ type	
Power piston	Bore	400mm
	Stroke	200 mm
	Swept Volume	25132.7cc
	Drive Mechanism	Schoch York
Displacer Piston	Bore	800mm
	Stroke	80 mm
	Swept Volume	40212.4 cc
Heat Exchanger		
Heater	Volume	14866.3 cc
	Type	Fin Tube
	Material	Copper
	Number of Tubes	8
	Pitch of Fin	3.2 mm
Cooler	Volume	14866.3 cc
	Type	Fin Tube
	Material	Copper
	Number of Tubes	8
	Pitch of Fin	3.2 mm
Regenerator	Volume	2424.6 cc
	Type	Wire Matrix Laminated
	Material	Brass Wire Cloth
	Mesh	50

2. 2 実験結果および考察

図7は、バッファ圧力を1気圧(101.3 kPa)、1.5気圧(152 kPa)、2気圧(202.6 kPa)と変化させたときの高温空間側代表ガス温度、および低温空間側代表ガス温度を示したものである。バッファ圧力を高めるに従い、高温空間ガス温度は低下し、逆に低温空間ガス温度は上昇する傾向を示すが、両空間のガスの温度差は約70~80℃であることがわかる。

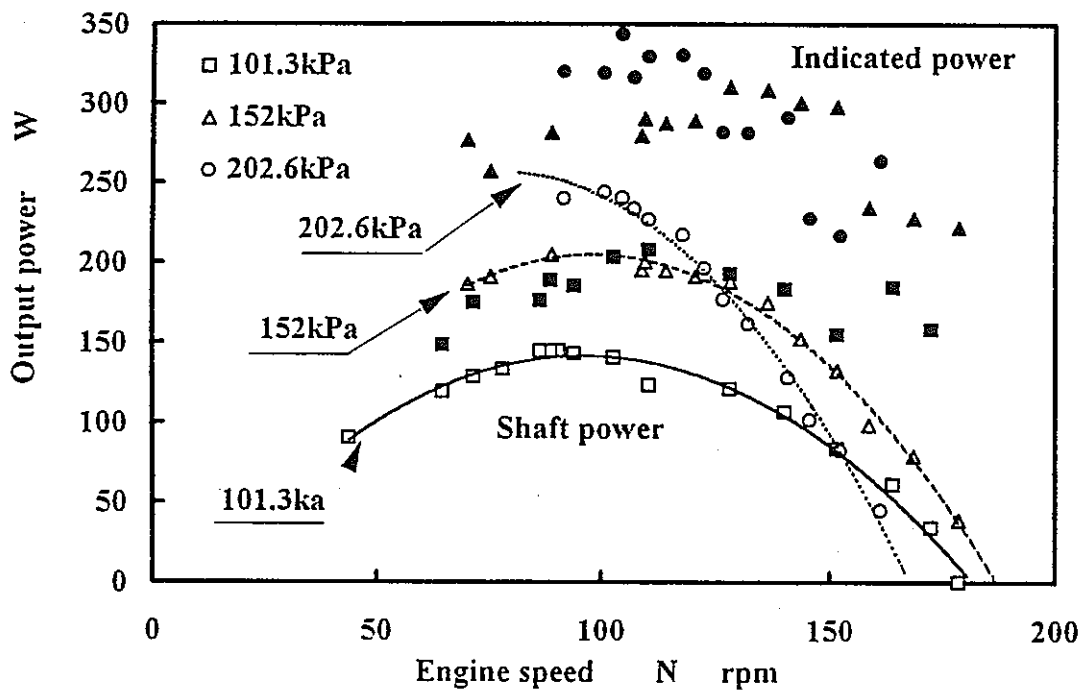


図7 バッファ圧力とガス温度の関係

図8は、バッファ圧力の違いによる出力特性を図示したものである。この図から、バッファ圧力を高めると図示出力および軸出力ともに大幅な向上が認められ、このエンジンの最高回転数は180 rpm 付近となっている。また最大軸出力を与える回転数は約90~100 rpm となっており、出力を最大とさせるような条件が存在するといことがわかる。

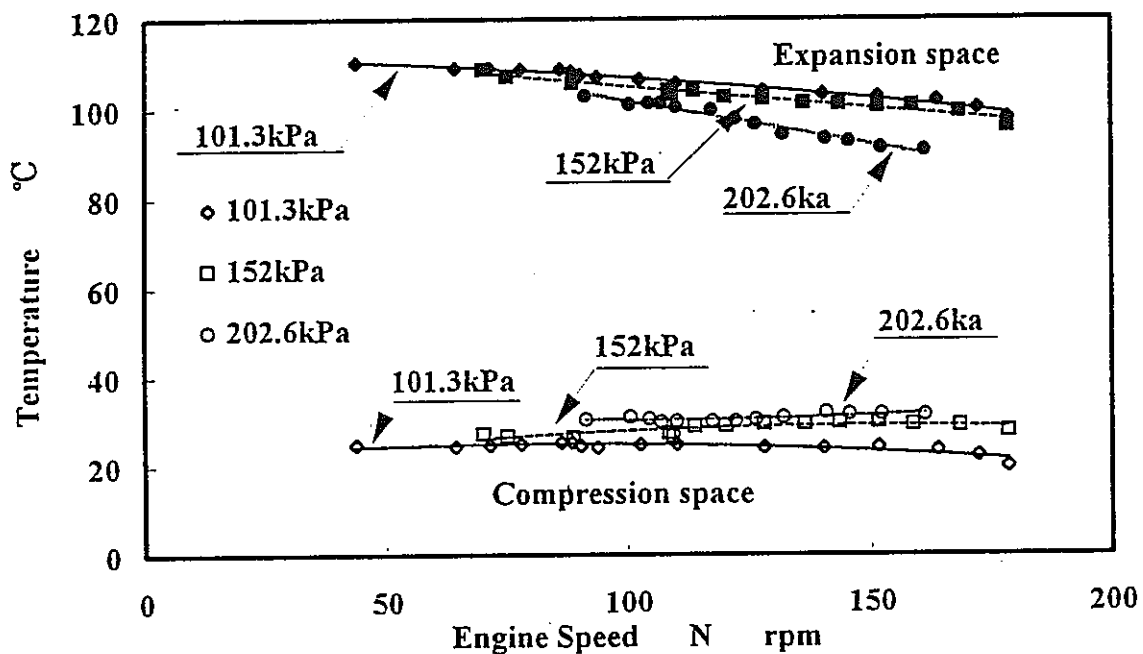


図8 バッファ圧力と出力特性

図9は、図8より得られた最大図示出力、および最大出力をバッファ圧力に対して図示したものである。この図より、図示出力はバッファ圧力を上げるにしたがって上昇し、バッファ圧力2気圧で約350Wとなっている。一方、軸出力はバッファ圧力1.5気圧で約205W、2気圧で約244Wとなり、バッファ圧力を上げることによる出力の飛躍的な増加が認められる。これより、バッファ圧力を上げ最適運転条件を与えれば、本供試エンジンにおいて軸出力500Wの達成が十分期待できるものと思われる。

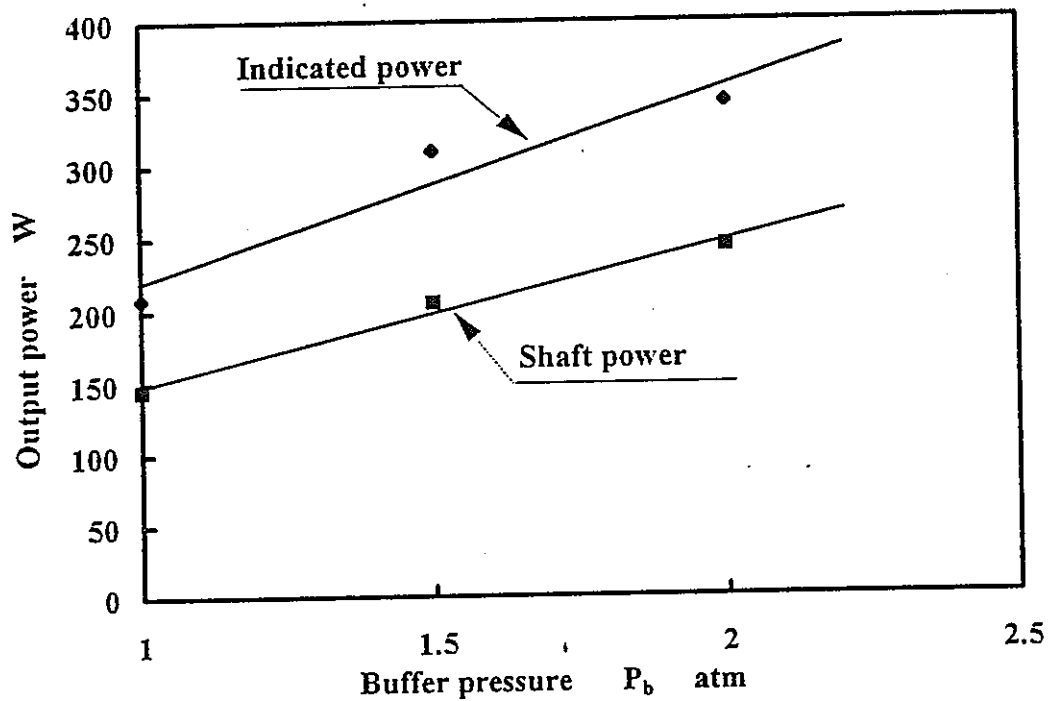


図9 バッファ圧力と最大出力の関係

2.3 小型山の神Ⅱ号の試作および試験状況

(1) 試作

山の神Ⅱ号は、低温度差スターリング・エンジンの実用化を想定し、小型高出力（1 kW）化を目的として開発しようと考えている。このため、従来の低温度差エンジンに比べて基本構造が大きく異なっていることから、山の神Ⅱ号の開発に先立ち、シミュレーションの検証および機構部等の動作確認、さらに高バッファ圧力状況におけるエンジン性能等の検証を行うため、「小型の山の神Ⅱ号」の試作を行った。設計試作したエンジンを図10に、その仕様を表2に示す。

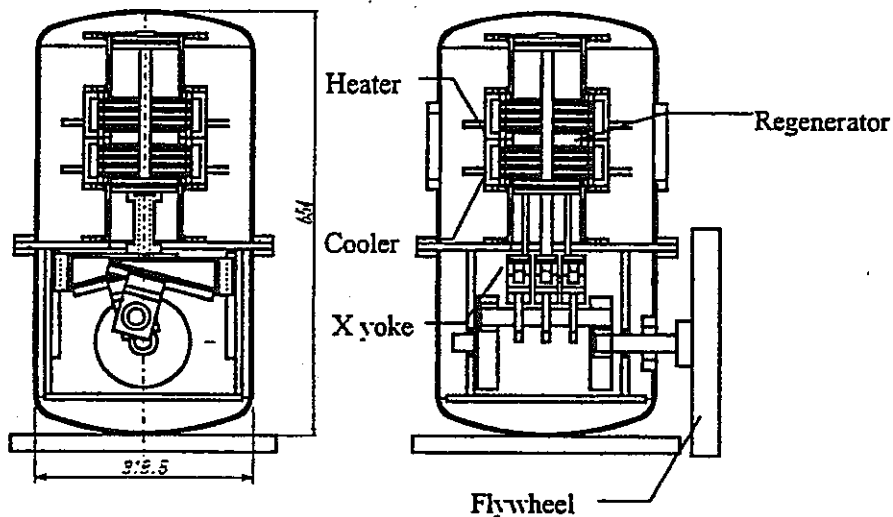


図10 エンジン構造

表2 エンジン仕様

engine type	α type Stirling engine	
Expansion side	Swept volume[cc]	612.23
Compression side	Swept volume[cc]	612.23
Heater	Type Volume[cc]	Cross flow type 295.84
Regenerator	Type Volume[cc]	Wire matrix 138.86
Cooler	Type Volume[cc]	Cross flow type 295.84
Driven mechanism	X-yoke mechanism	
Phase angle[deg]	150	

この小型山の神Ⅱ号の基本構造は山の神Ⅱ号とほぼ同一であり、エンジンの大きさ（高さ）は山の神Ⅱ号の約 1/3 の 654 mm、パワーピストンのボア径は 1/4 の 100 mm となっている。エンジンの特徴は熱交換器を中央に配置し、その上下に膨張側シリンダおよび圧縮側シリンダを直線状に配置している。加熱器および冷却器には直交流タイプの熱交換器を採用し、再生器は金網積層式としている。膨張側、圧縮側ピストンの駆動機構には Xヨーク機構を採用している。この機構を用いることで駆動系のコンパクト化およびピストンリングのサイドスラストの低減を実現している。なおエンジンにはバッファ圧力付加用のシェルが取り付けられ、最高10気圧までのバッファ圧力の付加が可能な設計となっている。

(2) 試験結果および性能予測

図11は、バッファ圧力を大気圧とし、熱源温度を 120 ℃ とした場合のエンジン性能を図示したものである。なお作動ガスは空気としている。この図を見ると図示出力はほぼ直線的に増加し、再更回転数は従来の γ 形に対し飛躍的に向上しており、流動損失の低下による効果が大きいものと考えられる。しかし、軸出力はかなり低い値である。これは機構部の損失が大きいためであると考えられる。

図12は、熱源温度を変化させたときの軸出力の推移を図示したものである。熱源温度が高くなるに従い軸出力は向上し、140 ℃ 時には最高軸出力 3.52 W を発生している。これは従来の γ 形エンジンに比して、総行程容積に対して大幅な向上となっている。

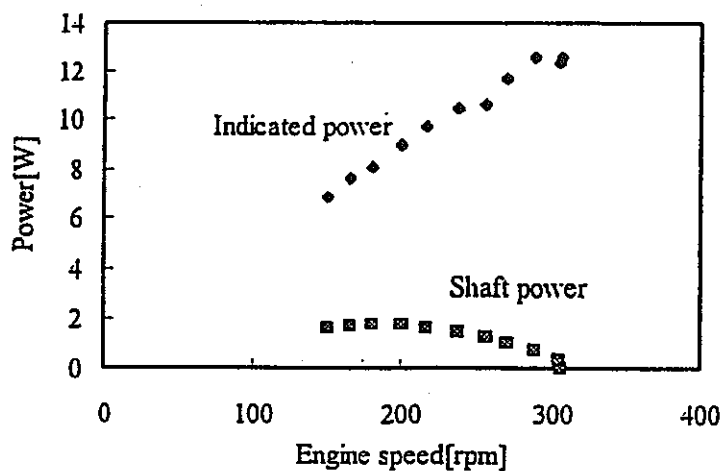


図11 エンジン性能（高熱源温度 120 ℃）

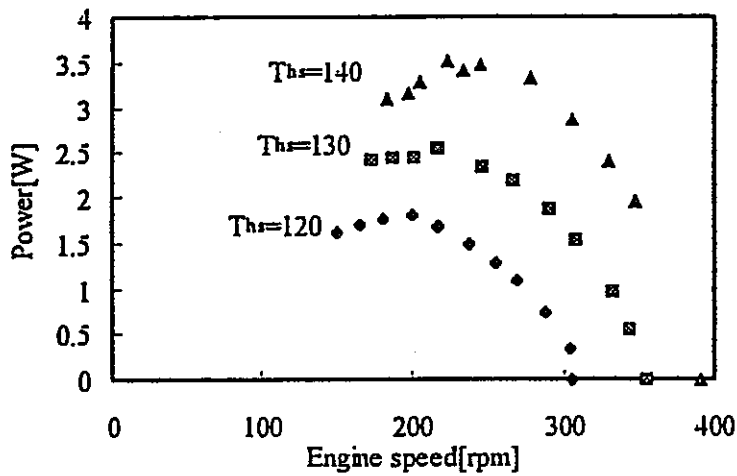


図12 高熱源温度の違いによるエンジン性能

図13は断熱モデルによるエンジン性能予測と、実測値との比較を示したものである。図示出力はほぼ正確に予測をすることが可能であることが確認できる。軸出力は若干実測よりも大きな値となるが、傾向はかなり正確に予測できている。

図14は高温側温度 100 °C、低温側温度 20 °C とした時のエンジン軸出力のバッファ圧力に対する推移をシミュレート計算したものである。流動損失の低減により最高回転数の上昇が期待でき、バッファ圧力を 300 kPa 付加時には 30 W 以上の出力が期待できる。今後はバッファ圧力を付加した場合のエンジン性能について検討を行う予定である。

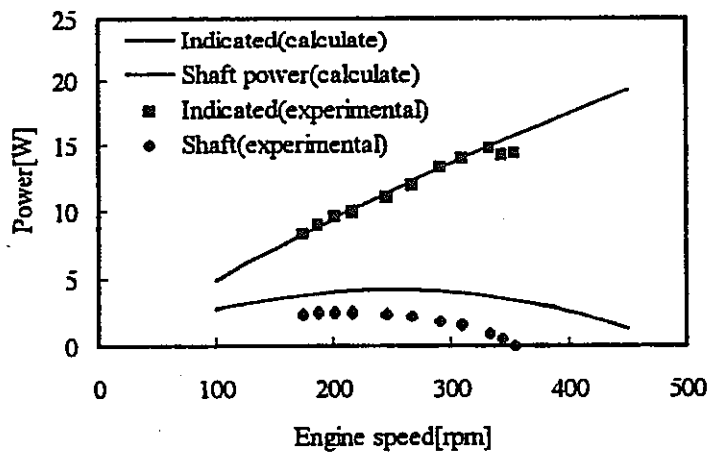


図13 性能予測と実測値との関係

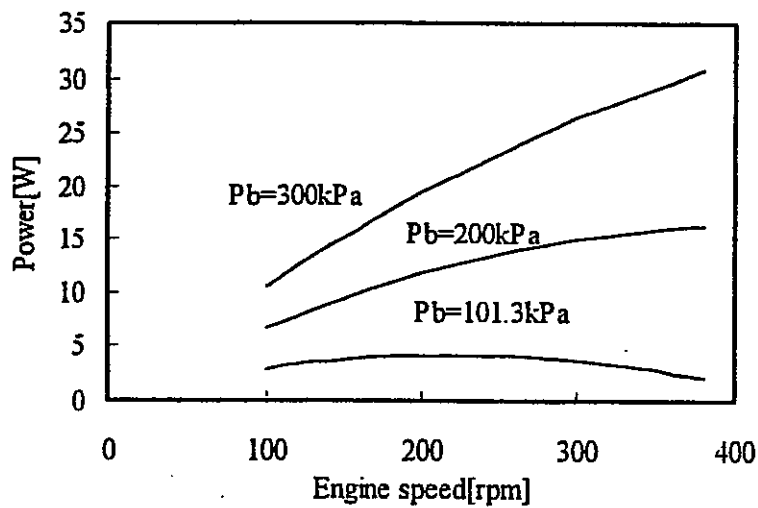


図14 エンジン性能予測

以上は、「スターリング発電システム研究会」において検討された成果である。表3に、本研究会の構成メンバーを示す。

おわりに、山の神は低温度差領域で作動するエンジンとして、世界に類を見ない高出力タイプのエンジンであり、山の神Ⅰ号によって実用化の可能性を見出し、第7回スターリング・サイクル国際会議において高い評価を得た。今後、低温度差スターリングエンジンの実用化によって、自然エネルギーを用いる環境に優しい無公害エンジンとして、地熱、温泉熱および排熱などの再利用さらに未利用エネルギーの見直しなど、その応用分野は広く、地球環境汚染の防止および省エネルギーに与える影響は大きいものと考えられる。

表3 スターリング発電システム研究会 メンバー表

	氏 名	所 属
座 長	澤岡 昭	東京工業大学 教授、応用セラミック研究所長
委 員	岩本 昭一	埼玉大学 工学部機械工学科 教授
	戸田 富士夫	埼玉大学 工学部機械工学科 技官
	平田 宏一	埼玉大学 工学部機械工学科
	百瀬 豊	アイシン精機(株) 第二開発部 部長
	竹内 誠	(株)サクシヨソ瓦斯機関製作所 常務取締役
オブザーバー	根岸 仁	動燃事業団 大洗工学センター
	大木 耕一	動燃事業団 核燃料サイクル技術開発部
	衣笠 学	動燃事業団 核燃料サイクル技術開発部 担当役
	杉本 照明	(株)明興社
事 務 局	小奈 勝也	(株)テクノバ 調査研究部長
	伊藤 稔	(株)テクノバ 調査研究部 担当部長
	渡邊 千鶴子	(株)テクノバ 調査研究部

第 2 編

ゼーベック素子からなる給電充電システムの検討

第1章 検討の目的・背景

排熱エネルギー利用、自然エネルギー利用の重要性が認識され、それらの研究開発が行われているが、必然的に変動出力であるこれらのエネルギーを効果的に利用するためには、変動エネルギーを効率良く蓄積し、負荷が要求する出力を安定に供給するシステムが重要になる。

本提案システムは、前記の重要性・有用性の認識を高めるために、小規模・簡便なモデルを作成してそれらを実証しようとするものである。

1. 1 排熱利用

産業廃棄物焼却処理において発生する多大な熱エネルギーは、ただ単に自然界へ放出するのが一般的である。また、一般の製造工場、都市高層ビル、さらには市民生活において発生する熱も同様に大気中にすてられている。

一方原子力産業界においては、放射性廃棄物（ガラス固化体）の崩壊熱は強制的に冷却を行い放出されている。原子炉施設や核燃料サイト施設などから発生する熱も、一般産業界と同様に排熱として海中や大気に放出されるのみである。特にガラス固化体などの有効利用を図ることは、原子力全体のエネルギー・コストのみならず、PA上の観点からも大きな意義がある。

1. 2 熱回生技術開発

近ごろ地球温暖化現象が叫ばれているが、このような排熱を放出することで済ますことなく、その対応を真剣に考える土壌が育成されてきていると考えられる。

熱回生技術としての取組方は、これらの排熱を電気に変換することとする。排熱の多くは、大気中の水の沸点の100℃前後を最大の温度と考えることができる。この温度は、これまでの利用形態からは低温度であり、その効率、経済性の問題から積極的な利用の検討は遅れているのが現状である。

したがって、低温度の排熱利用（熱回生技術開発）に関する研究を積極的に実施し、様々な発生源に対応できるシステムを構築していくことが重要である。これまでの多くの熱利用は1000℃近傍の高温度領域が対象であり、しかも商用エネルギー

源として経済性が成立つことが課題とされてきた。そのため、図1に模式化したように、高エネルギー密度を期待することから、その利用温度域は高温であり、一般工程からの排熱が利用対象となることは極めて少ない。

熱回生技術は、回生の幅を広げる考えから、発生源の温度を問題とするというよりは、発生源と周辺環境との温度差を対象とすることに重点を置くものである。この温度差の大小により最適な回生システムを提供していくこととしている。

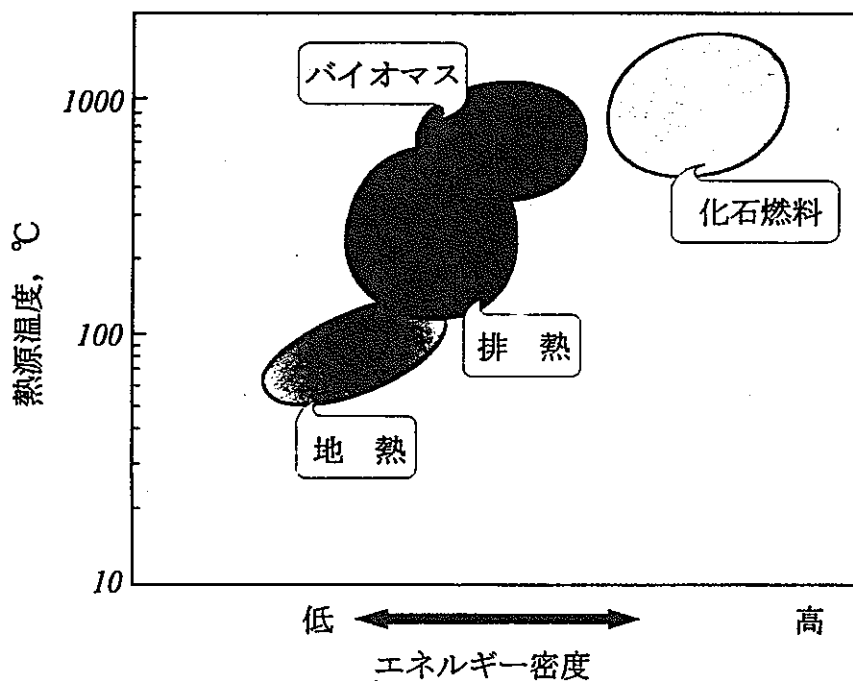


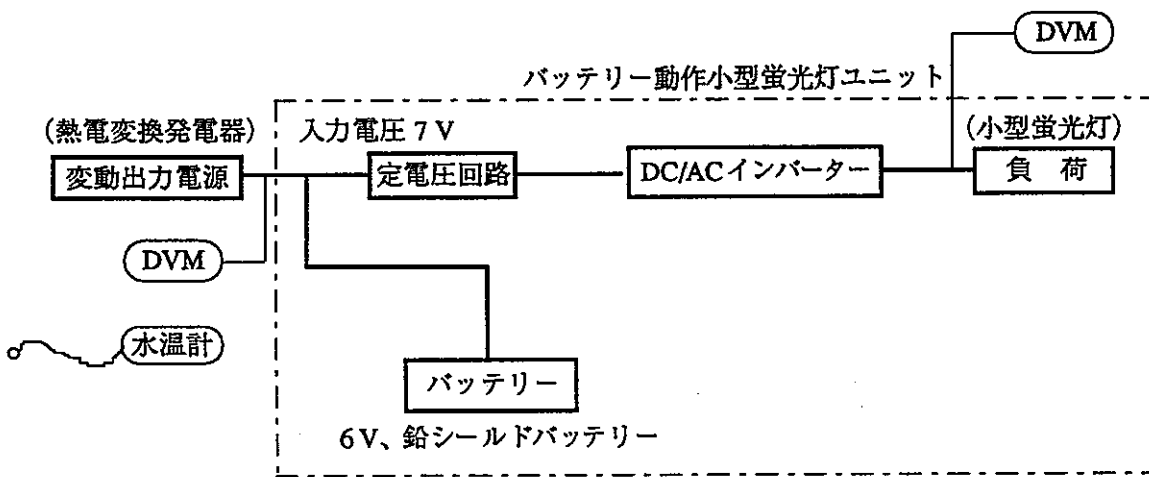
図1 エネルギー密度と排熱温度

第2章 ゼーベック素子からなる給電充電システムの検討

ここでは、既存のバッテリー動作小型蛍光灯ユニットを利用し、これに熱電変換発電器を組合わせたシステム考えるものとする。

2.1 回路要素

給電充電システムとバッテリー動作小型蛍光灯ユニットの回路要素を図2に示す。



注) DVM:デジタル電圧計、水温計:デジタル温度計(湯温測定用)

図2 ゼーベック素子からなる給電充電システムのブロック・ダイアグラム

2.2 熱電変換発電器

(1) 加熱用熱源の考え方

- ・ 沸騰した湯が入った鍋の側面に熱電変換発電器ユニットを接触させ、熱電発電を行う。
- ・ 放熱は自然空冷とする。
- ・ 鍋の加熱には、安全を考えて電気コンロを使用する。

(2) 熱電変換発電器の動作温度の設計と、発電出力の推定

1) 各部の温度分布

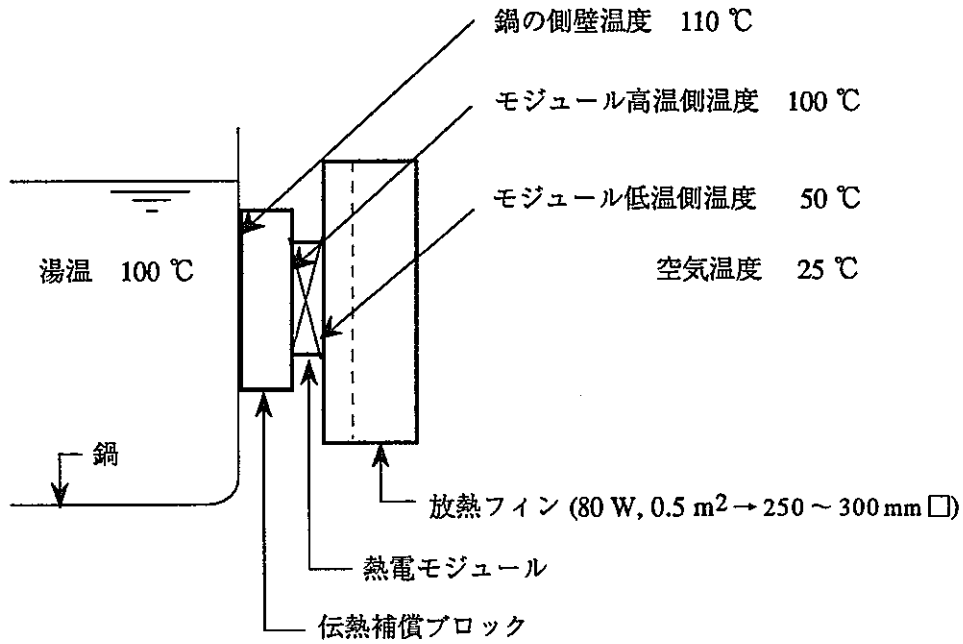


図3 各部の推定温度分布

2) 熱電モジュール

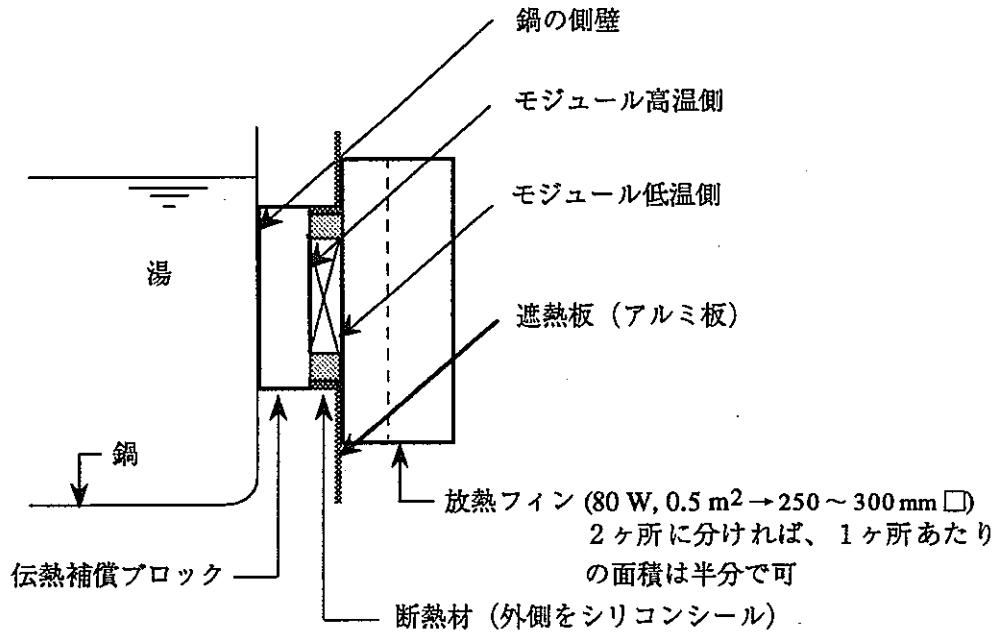
熱電モジュール(T-08G132-QDO)を上記の温度分布にて動作させた場合の出力を、素子の仕様から推定する。

推定計算の結果、T-08G132-QDO をモジュール温度差 60 °C、モジュールを 10 個直列接続した場合に、前記小形蛍光灯ユニットを駆動可能となる。

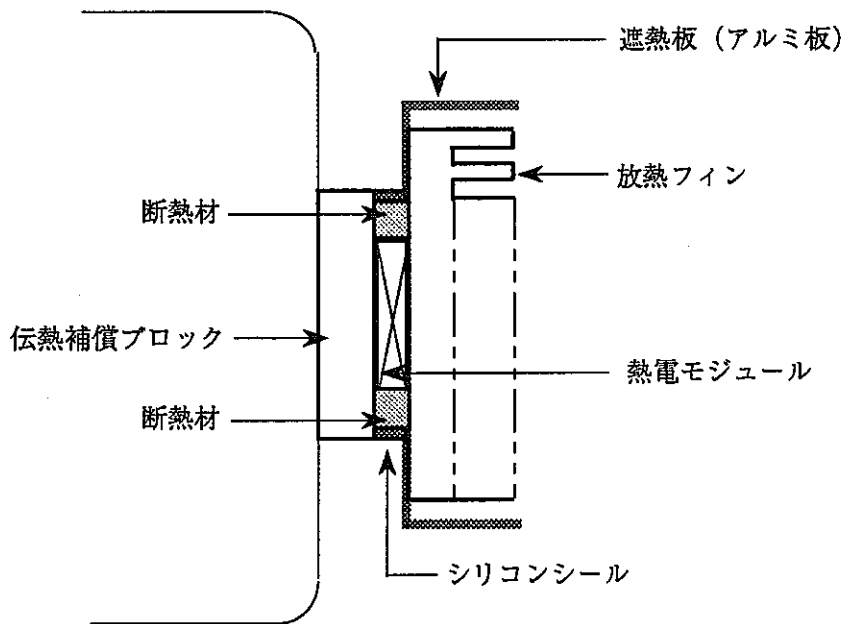
表1 モジュールの組合せ出力特性 (推定値)

負荷抵抗 (Ω) \ 項目	電圧 (V)	電流 (mA)	電力 (W)
1	6.8	190	1.27
2	6.9	190	1.27
4	7.0	180	1.26

(3) 熱電発電器の構造



垂直断面図



水平断面図

図4 熱電発電器の構造

2.3 性能確認試験

(1) 目的

「ゼーベック素子からなる給電充電システム」の熱的、電気的性能を実測により確認する。

(2) 方法

鍋の水温が冷えた状態から加熱を開始し、湯が沸騰するまでの間、以下の測点の値を記録する。

- ①水温
- ②室温
- ③熱電変換器出力電圧
- ④蛍光灯入力電圧

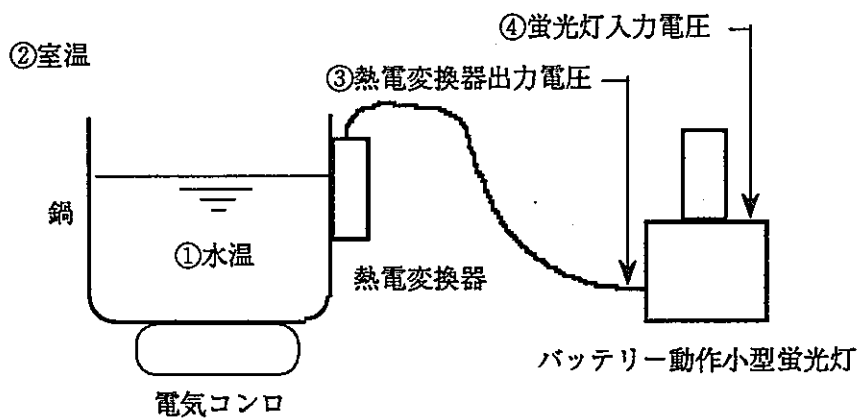


図5 性能確認試験における測点配置

(3) 測定結果

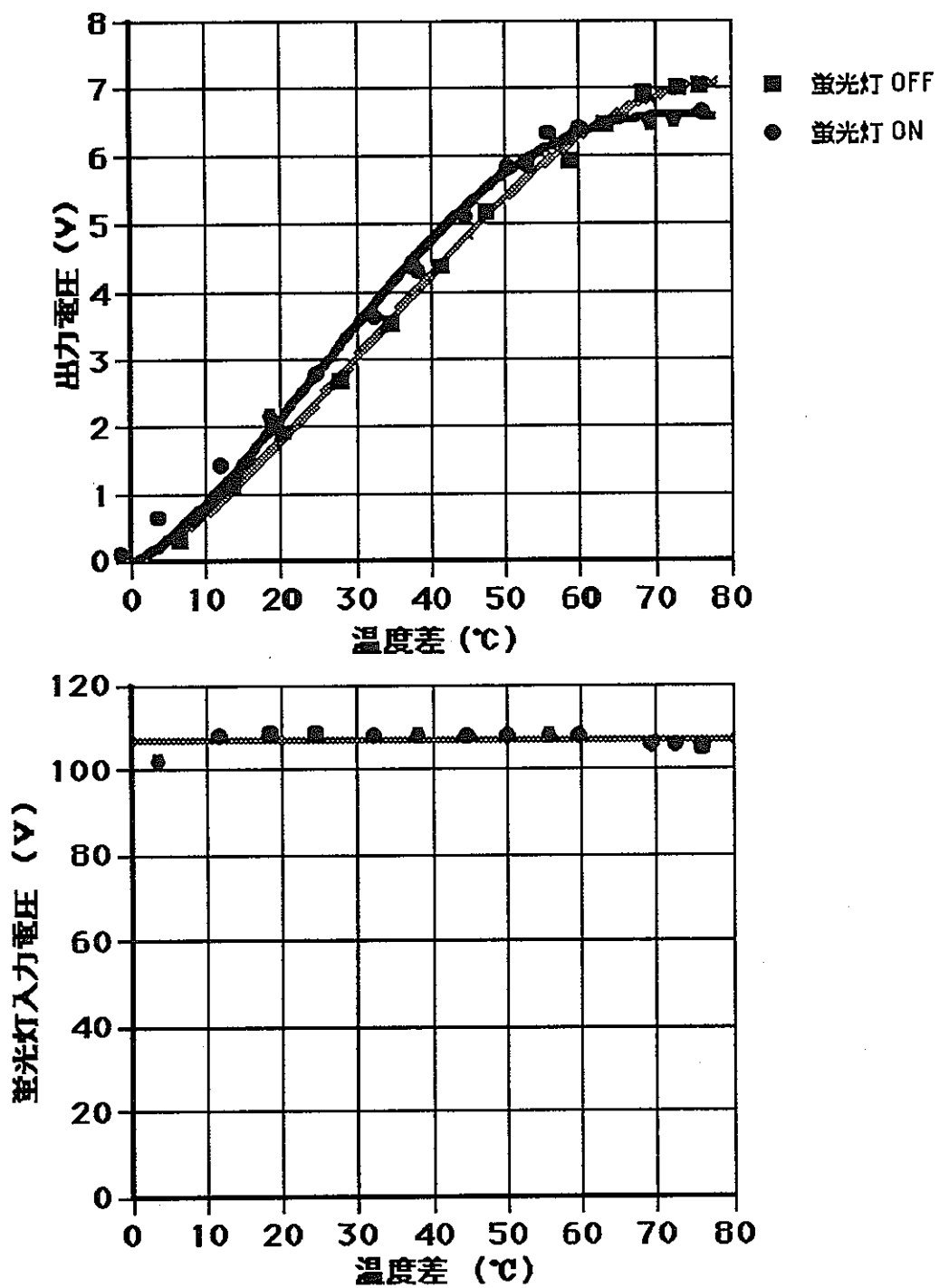


図6 熱電発電器出力電圧(上)、蛍光灯入力電圧特性(下)

註) 温度差: 湯温 - 室温

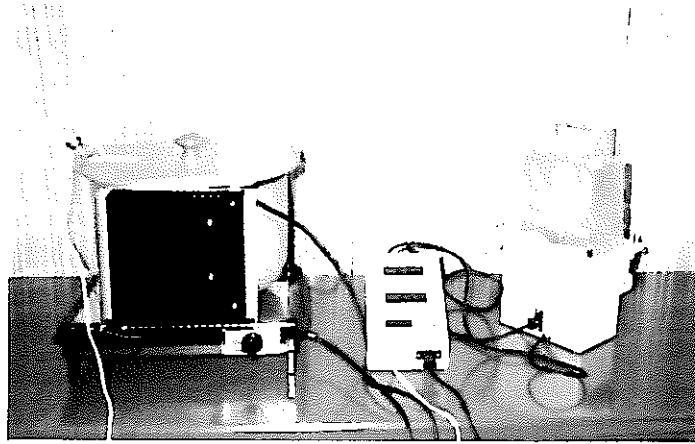


図7 ゼーベック素子からなる給電充電システム

(4) 考察

図7はゼーベック素子からなる給電充電システムの全体写真である。前記性能確認試験の結果から、次のように考察する。

- ①図6に示した熱電発電器の出力電圧は、温度差 60°C 以上において 6V 以上を出力している。小形蛍光灯ユニットが内蔵しているバッテリーは 6V の鉛バッテリーであるから、熱電発電器の出力電圧が 6V 以上を示す温度差を与えたときには、バッテリーを充電している。
- ②蛍光灯のON時、OFF時によって出力電圧に違いがあるのは、回路を流れる電流の差による熱電発電器の内部電圧降下の違いである。
- ③蛍光灯入力電圧は、出力電圧によらず、ほぼ 107V に保たれている。
- ④出力電圧のカーブが温度差 60°C 程度以上から飽和しているが、これは自然冷却による低温側の冷却限界に入ったためと考えられる。加熱を中止して、自然放熱に任せても、温度差が 60°C 程度まで低下するまではバッテリーを充電できる出力がある。
- ⑤したがって、加熱・放熱を繰り返すことにより継続して負荷（この場合は小形蛍光灯）を駆動できる。

第 3 編

ガス・クラスレートを利用した駆動システムの調査

第1章 ガス・クラスレート

数十年後に石油資源の枯渇が訪れることが確実視されている現在、エネルギーの有効利用が我々にとって非常に重要なテーマであることは言を待たない。エネルギー有効利用の最たるものは、廃熱回収である。従来、100℃を超える高温域の廃熱回収は様々な技術で実施され、相応の成果を得ている。しかし、廃熱量の過半数を占める数十度以下の低温排熱に関しては、大部分のものが回収されずに自然界に投棄されてきたのが現状である。

ここでは、低温度で高圧のガスに分解するガス・クラスレートの分解圧が、どの程度の駆動力になりうるかを簡単な装置を用いて評価した。

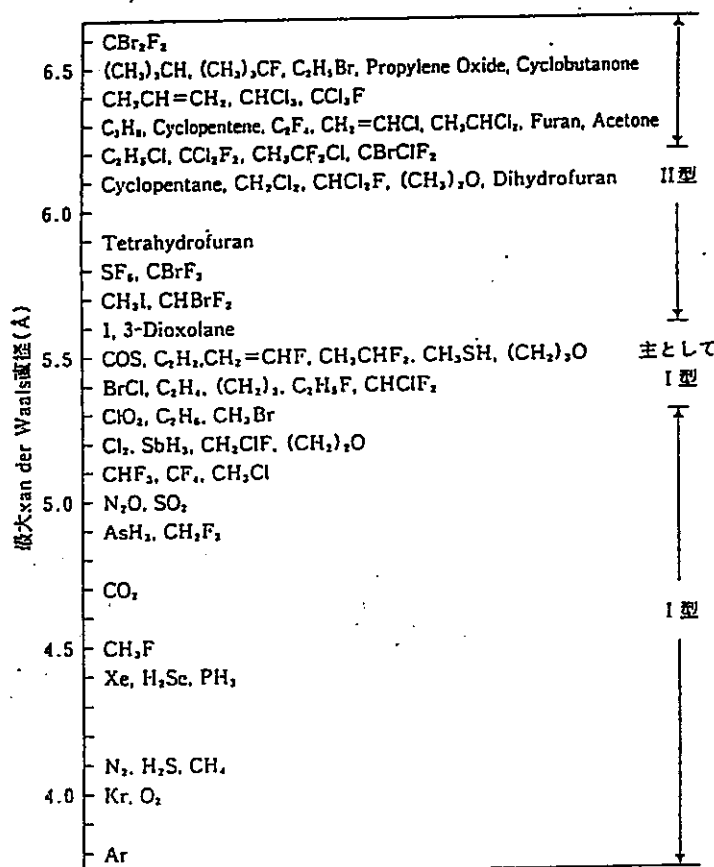
1.1 ガス・クラスレートの一般特性

種々の無極性および極性物質をゲスト分子として、水分子をホストとする結晶性のクラスレート水和物は、多くの化合物について単離されており、X線回折などによりその分子構造も明らかにされている。ここでクラスレートとは、閉じこめられたという意味のギリシャ語である。クラスレート化合物とは、ホスト側の分子が結合してできた三次元構造の内部に適当な大きさの空孔があつて、その中にゲスト分子が入込んで、特定の結晶構造をつくっている物質のことである。ゲスト分子の大きさや形状は、ホスト構造により規定される。

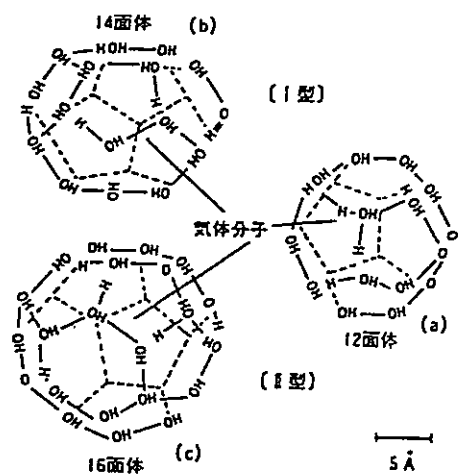
第1表には、クラスレート水和物をつくる分子の大きさの順に配列してある。これらの水和物の結晶構造は、50年代に Von Stakenberg らによって研究された。その結果、これらの水和物は全てかご形のクラスレートであつて、2種類の結晶格子が存在している。I型は、結晶の単位細胞の大きさが12.03 Å、II型は17.31 Åである。I型の格子は46個の水分子を含み、II型は136個の水分子を含んでいる。前者は平均半径3.91 Åの2個の小さなかごと、平均半径4.33 Åの6個の大きなかごからできている(第2図のa、b)。後者は平均3.90 Åの16個の小さなかごと、平均半径4.68 Åの8個の大きなかごからできている(第2図のa、c)。このかごは、水素結合でつながれた水分子によって組立てられており、ゲスト分子は、穴の中で自由に動き回っている。図に示すように、ゲスト分子が入る空孔は、I型ではそれぞれ12面(a)と14面(b)の面をもち、II型ではそれぞれ12面(a)と16

面(c)の面をもっている。これらの面は正五角形、または正六角形である。各種のアミン分子もかごの水和物をつくるが、上述のクラスレート水和物と違う点は、ゲスト分子のN原子がホストの水分子に水素結合で結ばれていることである。その意味でセミ・クラスレート(またはⅢ型クラスレート)といわれている。第2図にトリ・メチル・アミン水和物($(\text{CH}_3)_3\text{N}10 \cdot 1/4\text{H}_2\text{O}$)のセミ・クラスレート構造を示した。ゲスト分子は2種類の不規則なかごの中に閉じ込められている。第3図の(a)は2重の14面体のかごであり、(b)は理想的な15面体から著しく変形したかごである。

表1 簡単なクラスレートを水和物をつくる分子(大きい順に配列)



(出所) Davidson, 1973



(注) 実線は水素結合を示す
 (出所) Davison-Ripmeester, 1978

図1 気体水和物の構造

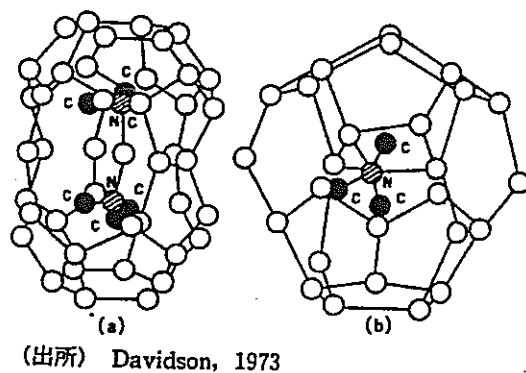


図2 トリ・メチル・アミンのセミ・クラスレート水和物の構造

1. 2 メタンハイドレート

メタン・ハイドレートは、前述したI型構造である（第3図）。水和数（ガス分子1個に対する水分子数）は、5.75 と計算されている。したがって、メタン・ハイドレートの理論化学式は、 $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ である。これから計算されるメタン・ハイドレート中のメタン・ガス含有量は、水 1 kg に対してメタン・ガス 9.66 モルである。これは、1 l の水に 216 l のメタン・ガスが取込まれていることを意味する。実際は、空隙が全てガス分子で満たされるようなことはまれで、充足率は 70~80 % 程度のことが多いので、含有されるガス量は水 1 l 当たり 150 l 程度になる。

表2 ガス・ハイドレートの 0 °C における分解・凍結圧力

ガス	0°Cにおける 分解・凍結 圧力(気圧)	ハイドレート の構造
N_2	160	I
O_2	120	I
Ar	95.5	I
Kr	14.5	I
Xe	1.50	I
CF_4	41.5	I
CH_4	26.0	I
C_2H_6	5.2	I
$\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2$	0.70	I (不安定)
CO_2	12.5	I
H_2S	0.92	I
Cl_2	0.32	I
C_2H_4	1.74	II
$\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2$	0.62	II
CHCl_3	0.065	II
$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	0.26	II
CBrClF_2	0.19	II

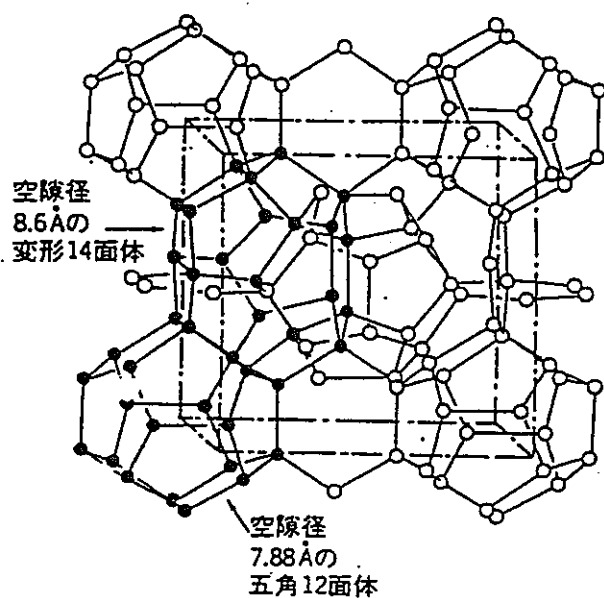


図3 メタン・ハイドレートの包接格子

一方、II型構造では、水和数は 17 で、ガス含有量は水 1 l に対して 73 l である。空隙充足率を 70 % とすると、ガスと水の容量比は 51:1 となる。

第2表は、0 °C においてガス・ハイドレートを作るために必要な最小の圧力を示している。たとえば、酸素ハイドレートを作るには120気圧の酸素ガスが必要であるが、メタン・ハイドレートは26気圧のメタンでよいことになる。

第2章 ガス・ハイドレート分解圧の評価

2.1 ガス・ハイドレートの生成と分解

ガス・ハイドレート（ガス水和物）の生成と分解は、図4に示すようにメタンとプロパンの混合ガスにおいては、温度領域 0～30℃の範囲で 5～500 気圧の圧力変化を示す。この特性を利用して、低ポテンシャルの熱源から高圧力を得、タービンなどを駆動することにより動力として取出すことが可能である。

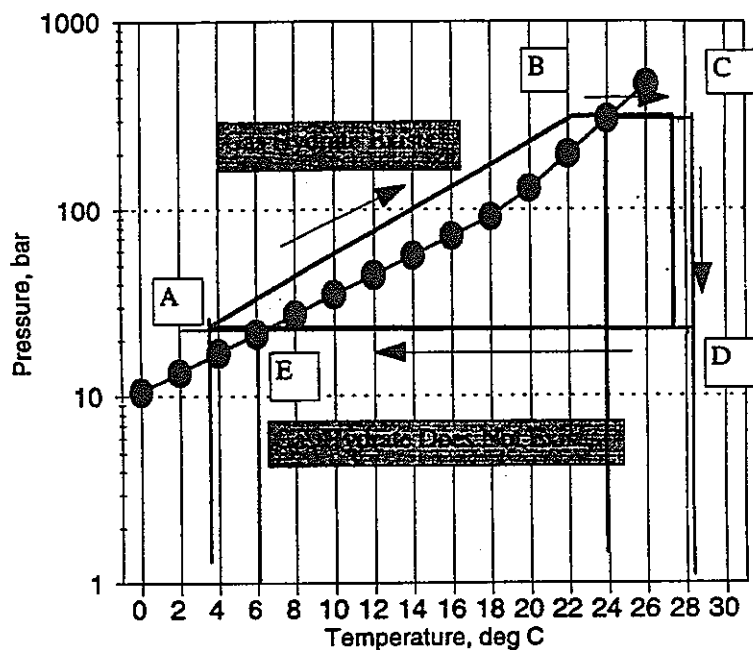


図4 ガス・ハイドレートの温度-圧力サイクル

この技術の技術の特徴を以下に示す。

- ①低ポテンシャル、小温度差（0～30℃）の熱エネルギーを高圧ガス（約300～500気圧）に変換する、ガス・ハイドレートの特性を利用した新しいエネルギー変換技術である。
- ②このエネルギー変換は、ガス・ハイドレートを密閉系システム装置内で相変化させることで達成しているため、外部環境へのガス排出を伴わないクリーンなエネルギー・システムであると言える。
- ③可燃燃料を必要としないため、構造体が熱応力を受けないので、長時間の稼働寿命が見込まれる。
- ④独立型システムを構築出来るので、分散型発電システムに適しており、適応範囲が広い。
- ⑤石炭火力あるいは原子力発電に比較して、経済的に優位であるとの評価もある。

2. 2 ガス・ハイドレート分解圧による駆動力の評価

(1) 目的

低温度でガス・ハイドレートを分解して駆動用として利用することを前提とし、入手可能なガス・ハイドレートを用いて、簡易な実験装置により駆動系が作動することを目視で確認する。

(2) 実験

1) 実施期日、場所

1997年1月10日、(株)テクノバ 会議室

2) メタン・ガス・ハイドレート

運搬容器；120 cc 耐圧容器×3本、-10℃ 50 kg/cm² に冷却加圧密閉

3) 実験装置

図5に示す。

4) 実験手順

- ①三口ジャーにハイドレートを砕かずに投入
- ②上部のロートから水を入れ、ハイドレートの分解を試みる
- ③分解が進み、内圧が上昇するところを見計らって、フロー・モニターにガスを供給しフロー・モニターの回転を観測する
- ④流出バルブの調整も試みる
- ⑤その間、湯温をモニターし、ビデオ撮影する

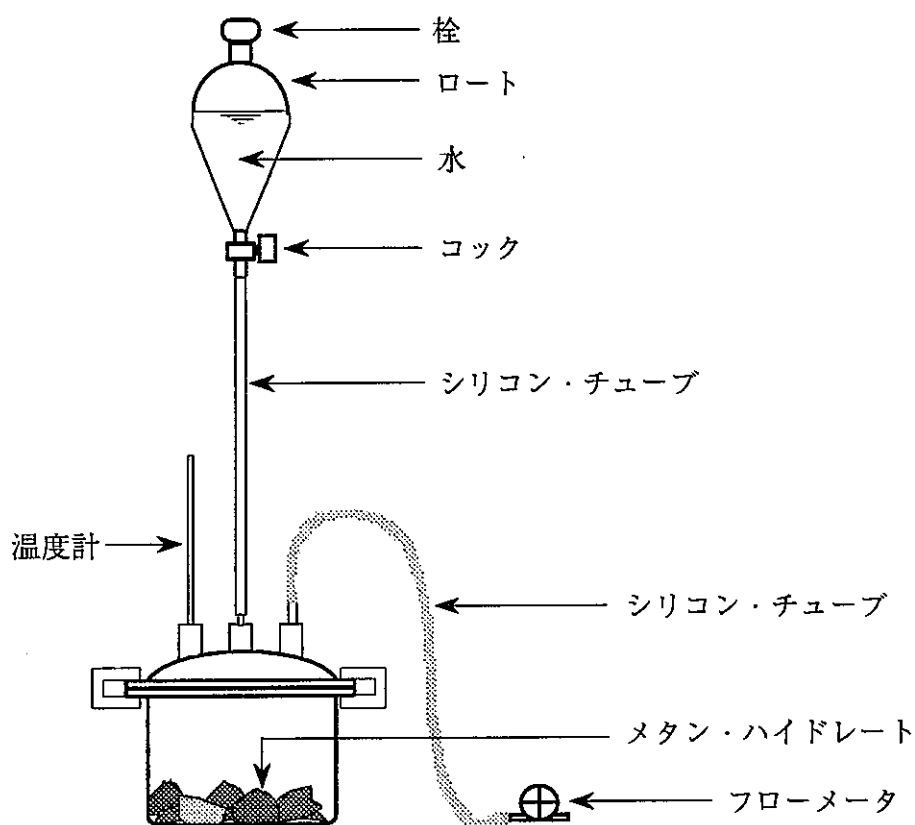


図5 ガス・ハイドレート分解圧評価実験装置

(4) 実験結果

図の実験装置にて、数回、数秒間づつフロー・メータの回転が確認できた。その間の容器内水温は、3℃程度であった。

ガスの流出をバルブにて調整し、フロー・メータの回転が持続するように試みたが、いずれも成功しなかった。

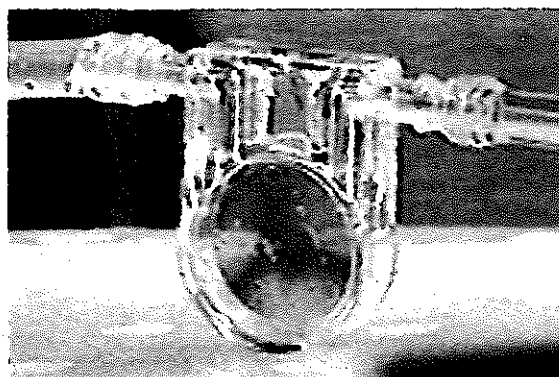


図6 回転中のフローメータ

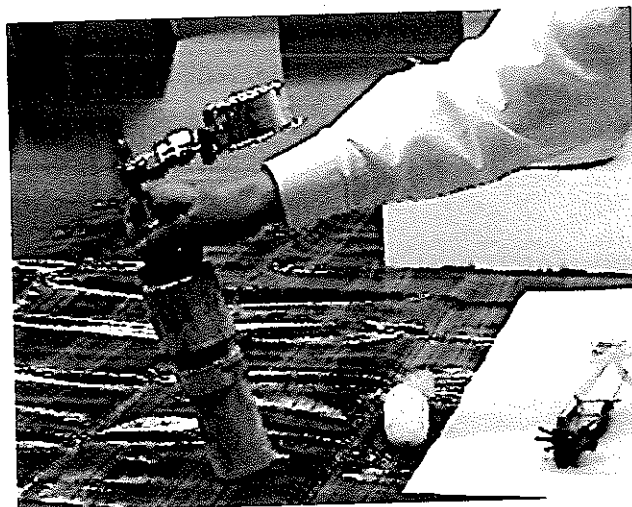


図6 メタン・ハイドレートと輸送容器

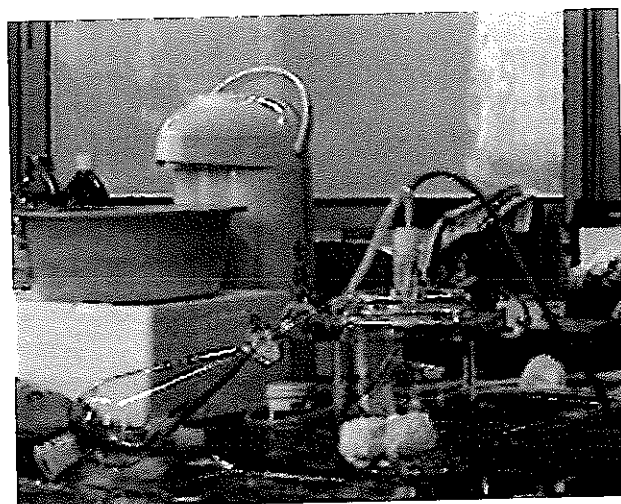


図7 ガス・ハイドレート分解圧評価実験器具

第 4 編

超電導エレベータの今後の開発指針の検討

第1章 超電導エレベータの開発経緯

1.1 垂直搬送の歴史

鉱山開発技術の発展においては、掘削残土、湧水処理、作業機材、労働者の運搬が極めて重要であり、鉱山の基盤技術として垂直搬送技術は発達していった。

人力、蓄力、水力（水車）による「つるべ」から、蒸気機関による「巻上げ」（エレベータの原型）に移行したのは、19世紀に入ってからのことである。

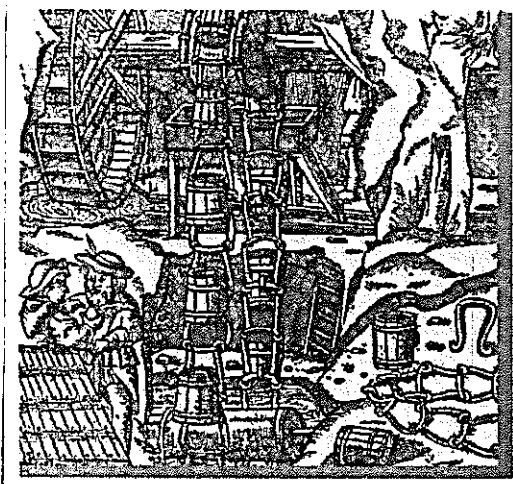


図1 水車で駆動される坑内排水装置(1556年)

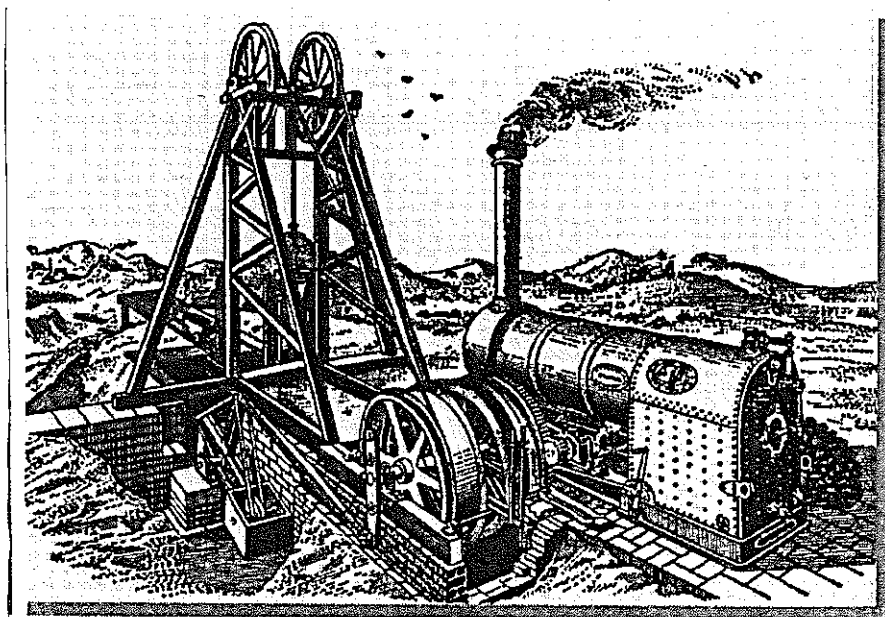


図2 鉱山用の蒸気巻上げ機(1880年頃)

1. 2 鉱山の技術から人員輸送へ

地上から高所に物を持上げるための機構は、古代エジプトでピラミッドを建設するときに使用されていたと言われている。中世では、修道院でロープと滑車からなるホイスト装置が使用されていた。

その後、蒸気機関の発達・普及から、人員輸送のエレベータへと垂直搬送技術が発展していった。

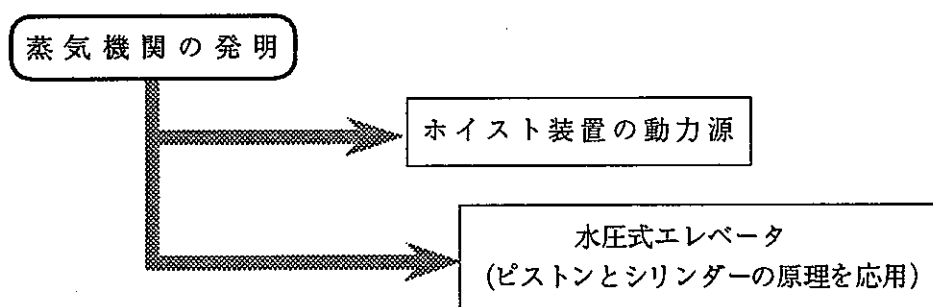
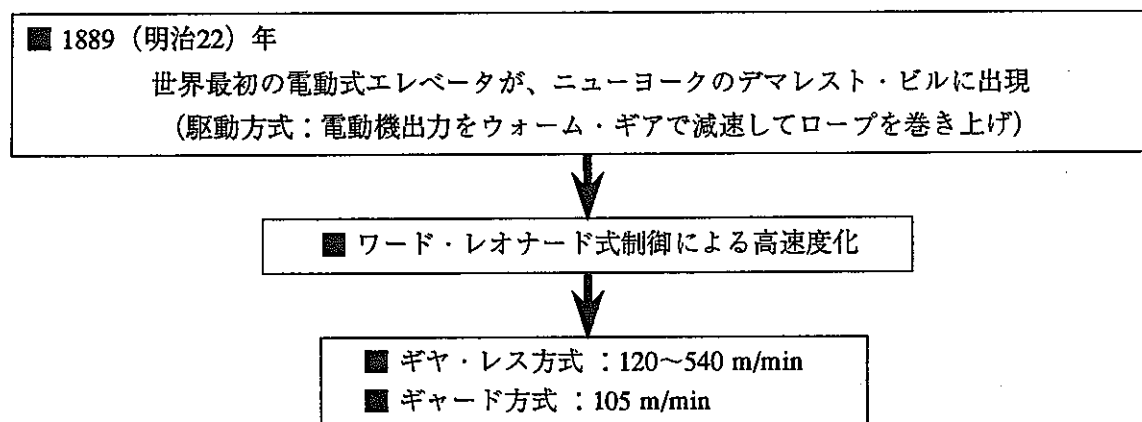


図3 蒸気機関と垂直搬送技術

(1) エレベータの実用化

安全装置付エレベータは、アメリカのエリシャ・グレース・オーチスが実用化した。それは、1854年のニューヨークのクリスタル・パレス博覧会で公開実験を行ったことに始まる。

表1 エレベータ技術の発達史



(2) 我国での実用化

日本初の電動式エレベータは、1890年、東京浅草の凌雲閣に実現した。その能力は、電動機出力：7馬力、到達時間：10階まで2分であった。

その後、1914年に東京日本橋の三越呉服店に、6台のオーチス社製エレベータが設置された。

(3) エスカレータの実用化

人員輸送の方法として、エレベータの他に、自動階段方式（エスカレータ）がある。この自動階段のアイデアは、1859年にナサン・エームズによって回転式階段の特許権認可がなされた。

1800年パリで万国博覧会が開催された折りに、オーチス社がエスカレータを出品して宣伝したが、1899年にアメリカのチャールズ・D・シーバーガーが踏段式エスカレータとして、オーチス社と提携して製造した2台が実用されたものである。

日本へのエスカレータの導入は、1914年に三越呉服店の新館に4台が設置されたのが最初となる。当時の三越報には、「全高十七尺、傾斜度三十度、階下より二十五秒にして階上へ達す、即ち一時間に三千七百五十人の乗客を送り得る計算なり」と記載されている。

1.3 超電導エレベータの開発

(1) μ G実験からエレベータ

貯蔵工学センター（計画予定地：北海道天塩郡幌延町）計画には、深地層研究施設という「放射性廃棄物」の地層処分のための研究施設の計画がある。この研究施設は、地下1000m程度の立坑を考えている。当時、この深地層研究施設の研究終了後の利用計画も考えることが要求されていた。

貯蔵工学センター計画は、地下利用を考えていく牽引的役割も果たし、その後、「ジオトピア」構想という総合地底開発のビジョンが検討されることとなった。

立坑の利用という観点から、自由落下による μ G（微小重力）を創出する機能について検討を行った。貯蔵工学センターからジオトピア構想として検討した地下式

μ G 実験は、北海道砂川鉱山の跡地と岐阜県東濃鉱山の二ヶ所で、実際の実験施設として実現され、今日有益な実験が進められている。

検討した μ G 実験施設は、良質の微小重量環境を得るため、超電導システムによる「切離し」（浮遊状態からの落下）と、制動制御を行うことを基本とした。特に落下カプセルのキャッチングは期待が高いものであったが、当時は技術的に困難というより、開発予算と期間の問題から採用には至らなかった。

この μ G 実験施設で検討した超電導システムによる制動制御は、この後、地下深部への廃棄物輸送システムとして検討することになった。これが超電導エレベータの開発の始まりである。

(2) 原理実証

1988年（昭和63年）、超電導マグネットを外部からの磁場で浮上させる「原理確証」のためのモデルを試作した。このモデルにより、世界で最初に非接触による垂直移動の確認を行った。

1989年（平成1年）には、LSM駆動の実証を目的とした、実験モデルを製作した。

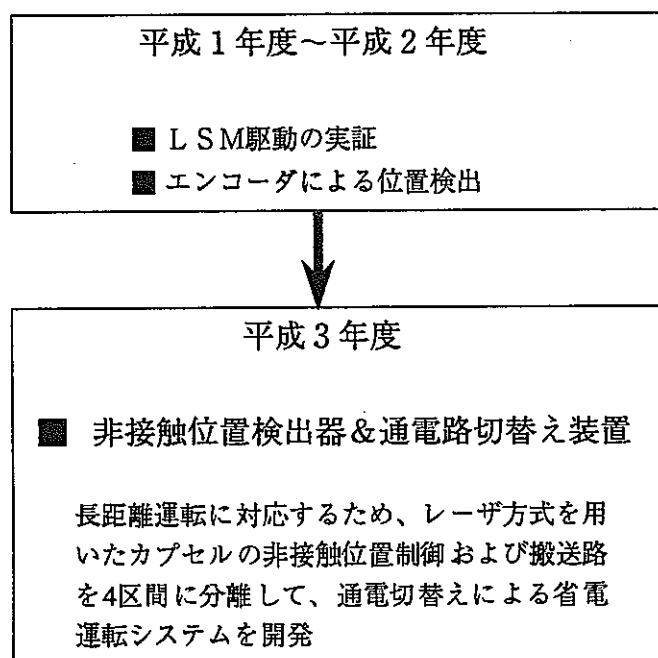


図4 原理実証モデルの開発推移

(3) 運動機能の高度化

1992年（平成4年）から、搬送物の制御と消費電力の低減化を考慮した運動機能の高度化技術の開発に着手した。搬送物として、超電導マグネットに変えて永久マグネットを用い、システムを簡便に運用できるように、小型確証モデルを製作した。実用化を考慮した場合、定常の運転区間の電機子コイルの位置間隔を粗くし、停止位置付近のみ密に配置することが、経済的要因が高い電機子コイルの個数減少方策として要求される。

このモデルでは、電機子コイルの配置間隔を変化させた実験が可能となった。電機子コイル間隔を変化させた場合でも、LSM駆動は可能であること（従来と比較して運動性能が同等であること）が確認できた。

1993年（平成5年）には、緊急時の脱出とか、システムの応用技術の確認のため、制御を開放した、いわゆる「打上げモード」での運動性能の評価も行った。4 m/secの上昇指令下、0.6mの打出し（発射）に成功した。これは電磁推進による打上げとしては当然、世界初のことである。

1994年（平成6年）からは、これまでのレーザ方式のカプセル追従式非接触位置検出では、検出精度、検出速度が充分でなかったことから、非接触位置検出システムの高度化のため、搬走路側方より光センサにて位置検出する新規検出システムを組込んだ。検出精度は±1 mmを維持し、カプセル移動速度も約4 m/secにおいて高速位置検出が確認された。

表2 電機子コイル仕様

項 目		仕 様
電機子コイル	巻線材質	ホルマール被服銅線 ϕ 3 mm
	巻線径	
	コイルピッチ 100 mm	内径 71×外形 141×高さ60 mm
巻線部寸法	コイルピッチ 80,90 mm	内径 71×外形 141×高さ40 mm

1995年（平成7年）から、搬送カプセルにエンコーダ・パターンを取り付け、電機子コイル間隙に設置したセンサーによって読み取りするという制御方式での運動性能の評価を実施した。

表3 永久磁の仕様

項 目		仕 様
永久磁石	材質 残留磁束密度 外形寸法	ネオジム系永久磁石 1.25 T (12,500 Gauss) 以上 φ45 mm×h 80 mm

第2章 超電導エレベータの普及方策

2.1 応用分野の検討会

超電導エレベータは、基本的にはニーズ・オリエンティッドで開発され実用化されなければならないと考える。しかし、牽引者が不在では到底実現できるものではない。

一方、利用者と情報を共有化できる姿勢を技術開発側から示すとともに、技術がいかなるものであるかを説明できるツールを提供することが必要である。特にニーズ・オリエンティッドであるためには、ニーズ側からの要望、問題点などの情報を取り入れた開発が不可欠であると考えた。そこで、今年度は超電導エレベータの応用分野の明確化のために、製作企業・大学・運輸・建設分野などの関係者からなる検討会を設置し、検討を行った。

表4 超電導エレベータ応用分の検討会 メンバー表

(順不同、敬称略)

	氏名	所属
座長	仁田 旦三	東京大学 大学院工学系研究科電気工学専攻 教授
委員	飯塚 友之助	清水建設株式会社 電力・エネルギー本部 総括部長
	石津 成一	JR東海旅客鉄道株式会社 技術本部 主幹
	日下 喜洋	東海大学 事業企画室 事務長
	坂井 廣	三菱重工業株式会社 神戸造船所 技師長
	里 優	大成建設株式会社 技術研究所 主任研究員
	高木 靱生	日本経済新聞社 編集局科学技術部 編集委員
	安田 尚樹	イラストレーター
ワーカー	大木 耕一	動燃事業団 核燃料サイクル部
	衣笠 学	動燃事業団 核燃料サイクル部 担当役
事務局	小奈 勝也	株式会社テクノバ 取締役調査研究部長
	伊藤 稔	株式会社テクノバ 担当部長
	渡邊 千鶴子	株式会社テクノバ 研究員

2. 2 産業界で期待される応用分野

超電導エレベータの基本システムが利用可能な分野を検討した結果を表5に示す。図5は応用分野の一例として作成した、宇宙ロケット打上げランチャーのイメージである。

次に、超電導エレベータの応用・利用に伴って、必要となるであろうと予想される周辺技術の課題を以下に示す。

- 高温超伝導材料の性能補償試験
- 簡易磁化システム
- 磁気遮蔽
- 電源および電源システム
- 電機子コイルの形状変更（用途に応じたリング状以外の形状）
- 非常制動システム
- 電力回生システム

このように、超電導エレベータシステムの応用分野や今後の開発課題を明確にすると同時に、牽引者を含めた開発実施体制を民間の協力下で展開するためには、超電導エレベータシステムが体験できるモデル（模型）とか、利用例を模擬した小形モデルを提供していくことが効果的であると考えた。

図6(1)～(3)は、部品を組替えることによって、ジェットコースター的な3次元運動と宇宙ロケット打上げランチャーなどに変更が可能な小形模型のイメージである。

表 5 超電導エレベーターの応用分野検討結果のまとめ

応用分野別視点		交通・物流設備	構造・内装設備	生産設備	試験研究設備	遊技設備
機能別視点	機能要素					
◆閉サイクル環状運動	利用の方向			-遠心分離器		-メリーゴーランド -観覧車の類
	ロングストローク		-免震 -アクチュエータ -カーテン、緩衝 -ブラインド -引戸	-長尺アクチュエータ -冷凍機 -圧縮機 -高圧ポンプ -高圧油圧ポンプ		
往復運動	クラックレス (運動方向無変換)		-循環エレベータ -超々高層建築 -エレベータ -乗ったまま何でも -移動可能な -ベッド、イス -階段昇降機 -無人郵便集配 -システム -自動塵芥収集 -システム			
	自由自在な動き	-無人自動車 -モノレール -チューブトレイン (都市、大陸間) -地形追従登山電車 -三次元(地下) -三次元(地下) -都市交通システム -都市物流システム -自動倉庫の -搬送システム		-廃棄物搬送システム		-ジェット -コースター
ワンスルー	重量物搬送 大加速度 高精度速度制御	-ランチャー (人工衛星など) -航空機短距離 -発着カタパルト -深海資源 -搬送エレベータ -グラダイターランチャー -キヤッチャー			-無重量試験施設 -加速度試験塔 -誘雷ロケット -ランチャー	
	◆非接触(浮上) ◆非摩擦駆動 ◆(駆動輪不要)	高纯净度環境 (不発塵) 汚染拡散防止			-バイオ、遺伝子など -高危険度操作関係 -の操作・搬送機 -半導体ウエハ搬送機	

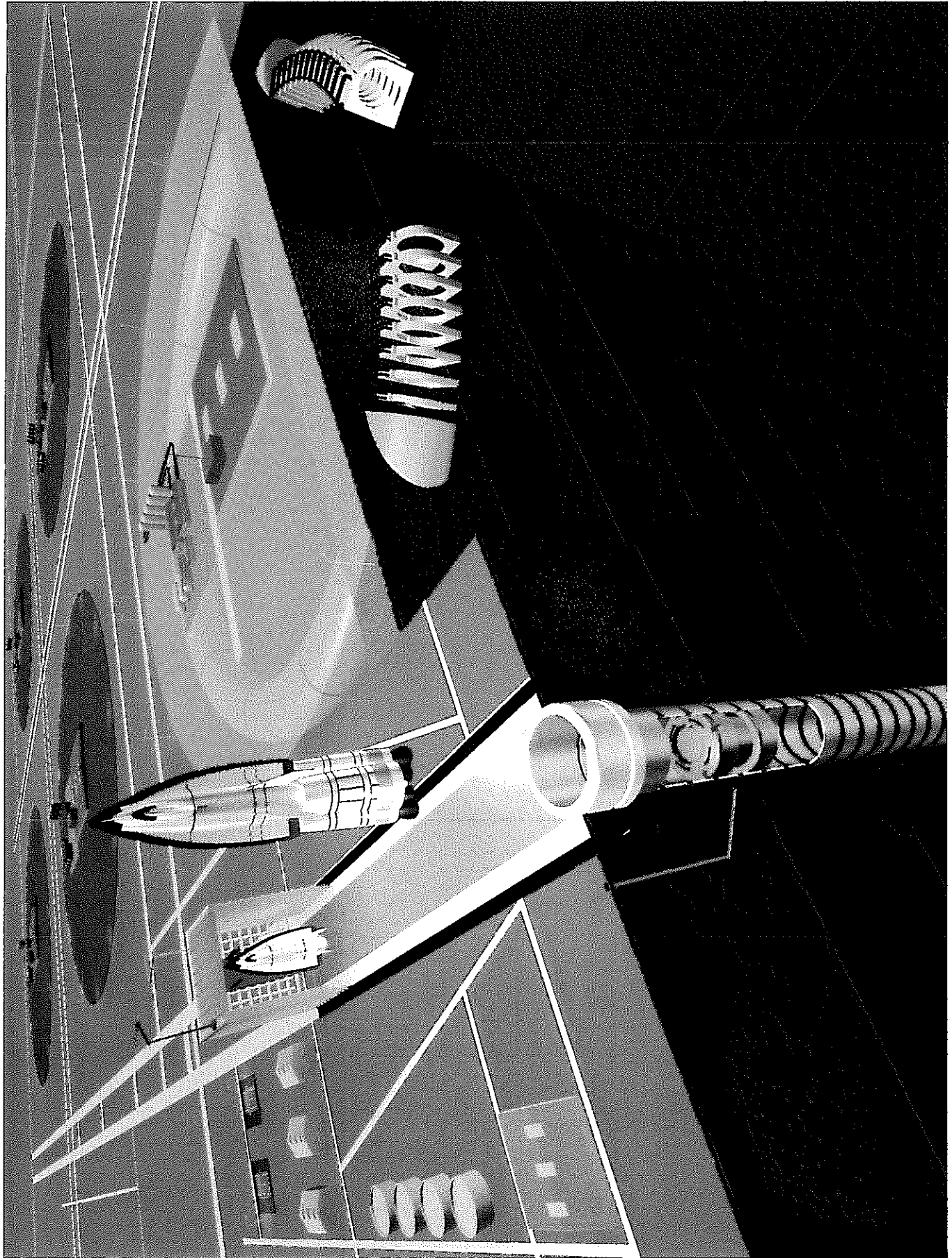


図 5 超電導エレベータを応用した宇宙ロケットランチャー



图 6 (1) 超電導エレベーターシステムを学べる模型のパッケージ

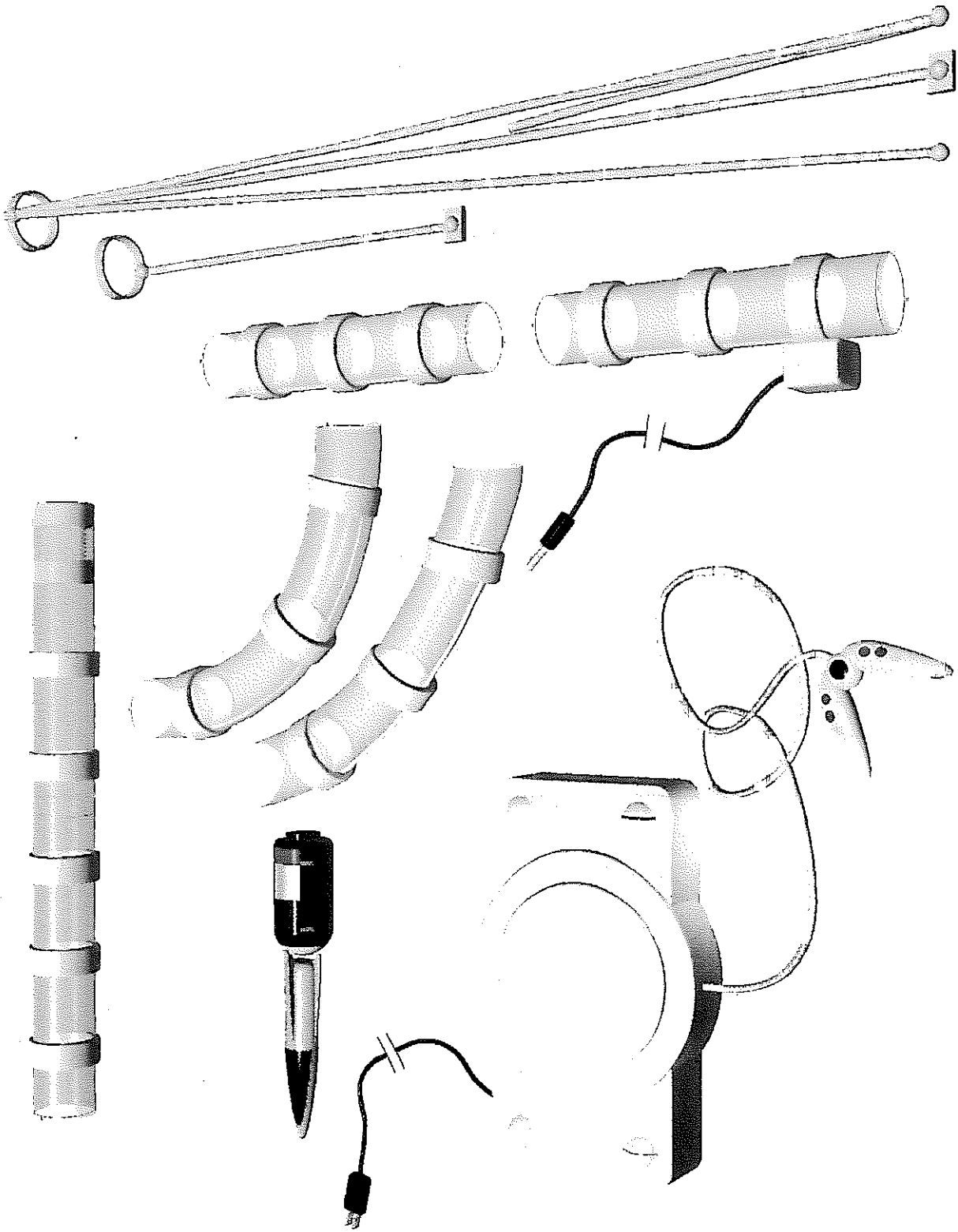
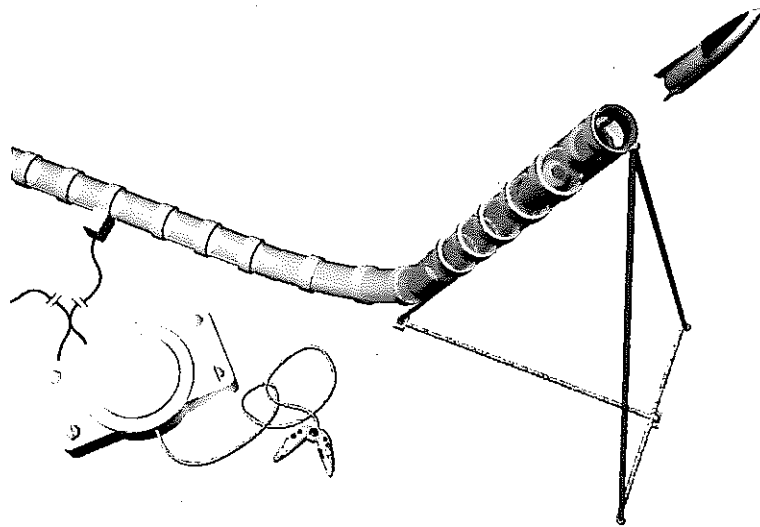


図 6 (2) 超電導エレベーターシステムを学べる模型の部品セット



宇宙ロケットランチャー



ジェットコースターのような3次元運動

図6(3) 超電導エレベータシステムを学べる模型の組立例

Appendix

■ゼーベック素子関係

- 1 熱電変換素子で排熱利用
－ 見え始めた普及のシナリオ －

■ガス・ハイドレート関係

- 1 ガス・クラスレートエンジンの提案
- 2 メタン・ハイドレートに関する海外の研究開発動向
- 3 クラスレート水和物
- 4 天然ガス生産・二酸化炭素海底隔離の基礎研究
－ 気体包接化合物の構造・物性の解明 －
- 5 メタン・ハイドレート合成実験と安定条件の検討
- 6 添加剤による、メタンのハイドレート化の促進と阻害
- 7 天然ガス・ハイドレートの生成条件

■超電導エレベータ関係

- 1 昇降機技術の展望
- 2 ロープレス・エレベータは可能か
- 3 ロープレス・エレベータ構想
- 4 ロープレス・エレベータへのリニア・モータ適用の検討
- 5 超超高層都市における移送手段

エネルギー
発電

熱電変換素子で排熱利用 見え始めた普及のシナリオ

熱を電気に変換する熱電変換素子。この素子の変換効率が設計値ではあるが10%を超えようとしている。耐久性や使い勝手の向上、量産技術の確立など実用化のための課題は残っているが、ここに来て発電素子としての活用に見えてきた。また、ゴミ焼却炉などの排熱からエネルギーを回収しようというプロジェクトも動き出し、量産による低コスト化の可能性も出てきている。発電素子としては、衛星用の発電システムなど限られた用途にしか使われていなかった熱電変換素子ではあるが、将来は民生品への適用も期待できる。普及のシナリオと変換効率向上のための研究動向をレポートする。

熱電変換素子（図1、p.42の別掲記事参照）が、中小規模のゴミ焼却炉や産業用の炉、自動車のエンジンなどから排出される熱（排熱）を回収する道具として注目されてきている。従来、これらの排熱はその大半を捨ててきた。しかし、環境保全や省資源の立場から、排熱利用が一つの課題となっている。

ゴミ焼却炉の排熱の7割は無駄に

科学技術庁航空宇宙技術研究所（航技研）の調査によると、全国の自治体が所有するゴミ焼却炉は約2000カ所。このうち、約130カ所のゴミ焼却炉では排熱を利用して発電している。この発電設備によって約42万kWを発電できる。しかし、残りの1900カ所弱

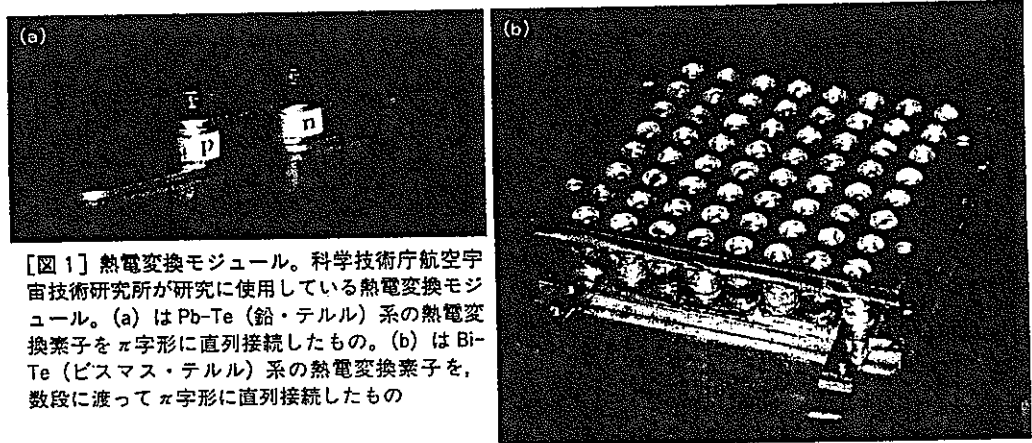
のゴミ焼却炉では排熱はそのまま捨てられており、その量は全国のゴミ焼却炉から出る排熱のうち約7割を占める。

排熱を捨てているゴミ焼却炉は、大半が中小規模のものである。大規模なゴミ焼却炉と違って、間欠運転でゴミを焼却するため、蒸気タービンが利用しにくい。このような中小規模のゴミ焼却炉でも熱電変換素子を使えば排熱からエネルギーを回収で

きる。現在、その効果を実証し実用化するためのプロジェクト（科学技術振興費による生活・社会基盤制度研究プロジェクト「廃棄物焼却等の未利用エネルギーの有効活用に関する研究」）が進んでいる（図2）。

設備費100円/Wのシナリオ

同プロジェクトでは、熱電変換素子を用いてゴミ焼却炉から排熱を回収する効果を次のように予測する。



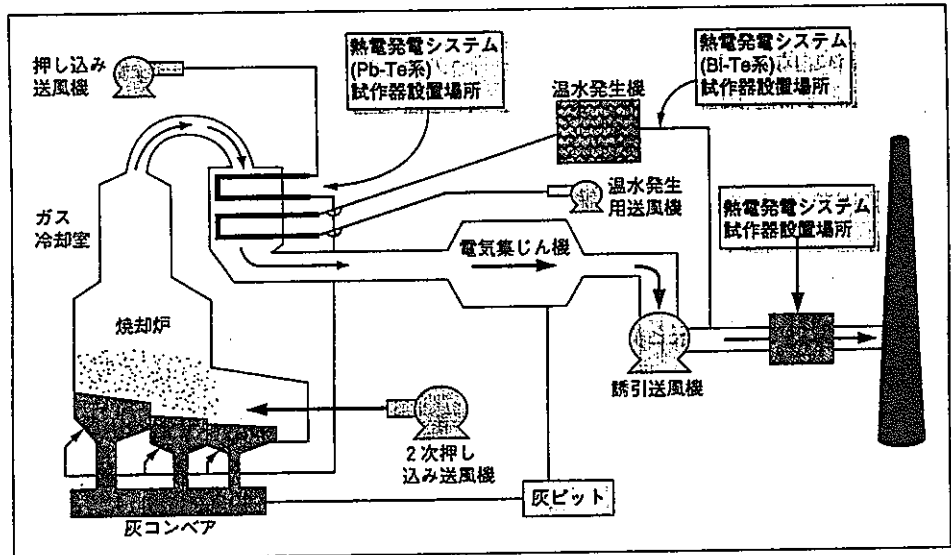
【図1】熱電変換モジュール。科学技術庁航空宇宙技術研究所が研究に使用している熱電変換モジュール。(a)はPb-Te（鉛・テルル）系の熱電変換素子をπ字形に直列接続したもの。(b)はBi-Te（ビスマス・テルル）系の熱電変換素子を、数段に渡ってπ字形に直列接続したもの

「自治体の持つ1900弱のゴミ焼却炉の排熱から40万~50万kWの電力が得られる。これに約3000ある民間のゴミ焼却炉を加えると、100万kWの電力を排熱から回収できる」(航技研角田宇宙推進技術センターロケット推進研究部ロケット高空性能研究室長の新野正之氏)。

ゴミ焼却炉に熱電変換素子を使うことによって熱電変換素子が量産され、低コスト化するシナリオが予想される。新野氏によれば「現在の熱電変換モジュールは1W当たり1000円。4000~5000の中小規模のゴミ焼却炉に熱電変換モジュールを使えば、量産効果によって1W当たり100円に下がる可能性がある」。

そうなれば、熱電変換モジュールの産業用途や民生品での利用も見えてくる。例えば、自動車のエンジンの、マニホールドの出口に熱電変換モジュールを取り付けてエンジンの排熱でバッテリーを充電すること。あるいは、風呂ガマに熱電変換モジュールを取り付けて点火や制御のための電力を供給するという使い方が考えられる。

大阪ガス技術部電気技術チーム課長の辻征紀氏によれば「風呂ガマや湯沸かし器などのガス機器に熱電発電システムを組み込む際の目安は、1kW当たり10万円」。熱電変換モジュールのコストが100円/Wになれば、一気に民生品での適用が進



【図2】 中型焼却炉の排熱からエネルギーを回収するシステム。「廃棄物焼却熱等の未利用熱エネルギーの有効活用に関する研究」のプロジェクトで、排熱からのエネルギー回収の有効性を検証するために考えられたもの。同プロジェクトでは仙台市のある中型焼却炉にこうしたシステムを設置し、96年暮れごろに第1回目の実験を行う予定である

む可能性がある。

変換効率の向上が第1の課題

ただ、上記のシナリオを現実のものとするには、その前提としていくつかの課題を解決することが必要だ。

一つは、熱電変換モジュールの変換効率を多くの用途で使えるレベルまで引き上げること。エネルギーを供給する発電システムとして使うならば、熱電変換モジュールをライフサイクルで見て、エネルギー収支がプラスにならなければ意味がない。

また、自動車では熱電変換モジュールによる車体質量の増加で燃費が悪化する可能性がある。従って、それを補うくらいの変換効率が必要だ。

各用途で必要とされる具体的な変換効率については、残念ながら的確な試算例はない。ただ、専門家が現

在目標にしているモジュールの変換効率率は「自動車のエンジンの排熱回収用で10数%から20%」(山口東京理科大学の松原覚衛教授)、「ゴミ焼却炉の排熱回収用としては5%以上」(新野氏)である。

これに対して「現状の熱電変換素子(材料)の効率は5~9%」(松原教授)。モジュールにすると、これらの素子に温度差を与えたり、電気を取り出すための構造(熱交換器、電極、絶縁材)を付けなければならないため、変換効率はさらに落ちる。新野氏によると「市販の一般的な熱電変換モジュールの変換効率は2~3%程度」という。

ただ、設計段階のものでは最近、変換効率が10~20%の熱電変換素子が出始めた。また、こうした熱電変換素子から効率良く電気を取り出

すための研究が並行して進められている。具体的な研究動向は後で紹介するが、電力中央研究所とダイキン工業は共同で、モジュールの変換効率を約10%（設計値）にまで高めている。

しかも、材料の傾斜機能化や材料構造の制御といった従来と異なる新しい切り口によって、高効率化のための新たな指針が提示されている。

なお、ガス器具のように「コストが下がれば変換効率は現状のままでも使える」（大阪ガスの辻氏）というものもある。これは、ガス器具では点火や制御のための小さな電源を家庭用の商業電源から分離することで使い勝手を向上させられるから。

停電でもふろを沸かせられれば、一つの付加価値になる。従って、エネルギー収支が重要な上記のものとガス器具では多少事情が異なる。

とはいえ、低コスト化の前提は量産化であり、ガス器具への適用も変換効率がほかのものに適用できるレベルに上がるのを待たなければならない。

また、もっと先の話をするれば「モジュールの変換効率が20%を上回れば、既存の発電所のボイラ、蒸気タービン、発電機、コンデンサからなる発電システムに置き換えて活用することも可能になる」（電力中央研究所柏江研究所原子力システム部研究主幹の神戸満氏）。熱電変換モ

ジュールとヒートパイプを組み合わせれば、高速増殖炉の熱を利用して直接発電でき、発電システムの構成を簡素化できる（図3）。熱電変換モジュールは排熱からのエネルギー回収に始まり、民生品での高付加価値化のための利用、さらには商業電源用の発電システムでの適用に広がる可能性がある。

低コスト化で問題になる資源量

上記のシナリオのもう一つの課題は、資源の問題を克服すること。現在は、変換効率を向上し、実用化技術を蓄積して、熱電変換モジュールの効果を実証する段階である。しかし将来、民生品まで適用を広めるに

熱電変換素子の原理

熱電変換素子は、熱を電気に変換する機能と電気を熱に変換する機能の二つを持つ。このうち熱を電気に変換する機能は、ゼーベック効果を利用したもの。ゼーベック効果とは素子中のある2点に温度差を与えると、低温部と高温部の間に起電力が発生する現象である。一般に、半導体に見られる。

通常、半導体は温度が高い方が電気伝導率 σ が大きいため、キャリア濃度が高くなる。すなわち、n型半導体では電子の濃度が、p型半導体では正孔の濃度が高い。

従って、半導体の2点に温度差を付けると、図A(a)のように高温部と低温部でキャリア濃度に差が付く。この濃度の差が原因で、キャリアの拡散が起こり、高温部から低温部へキャリアが移動する〔図A(b)〕。

そして、このキャリアの移動によって高温部と低温部の間に電位差が生じる〔図A(c)〕。n型半導体では高温部が高電位に、p型半導体では高温部が低電位になる。このため、この電位差によって一部のキャリアは低温部から高温部へ引き戻される〔図A(d)〕。

結局、拡散速度と電位差によって引き戻される速度が釣り合ったところで安定し、そのときの電位差が起電力となる〔図A(e)〕。

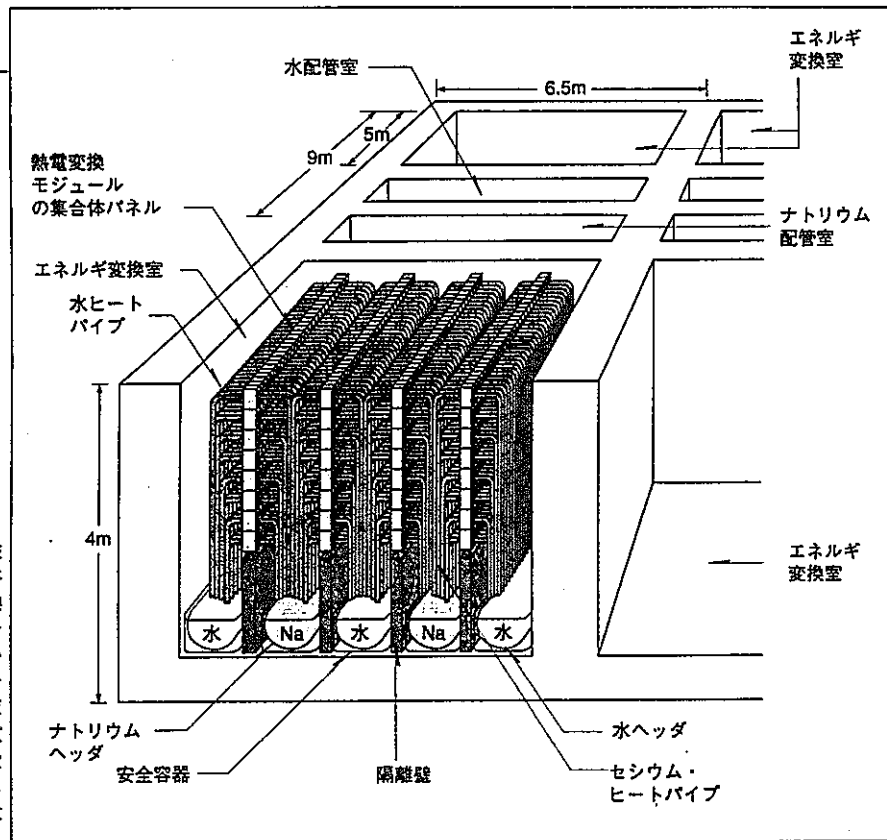
半導体が熱電変換素子として使えるかどうかは、こうしたゼーベック効果によって熱から電気をどれだけ効率良く取り出せるかで決まる。一般にその効率は、単位温度差で発生する起電力（ゼーベック係数 α ）と電気伝導率 σ が大きく、熱伝導率 κ が小さい方が良い。

しかし、通常は電気伝導率 σ が大きいと熱伝導率 κ も大きくなるという傾向にある。これは、熱が格子の振動以外にもキャリアによって

は、資源面での検討が必要になるだろう。

というのは、既存の一般的な熱電変換素子で変換効率が高いものは、Bi-Te (ビスマス・テルル)系、Pb-Te (鉛・テルル)系。実はこれらの熱電材料で必要とされているTe

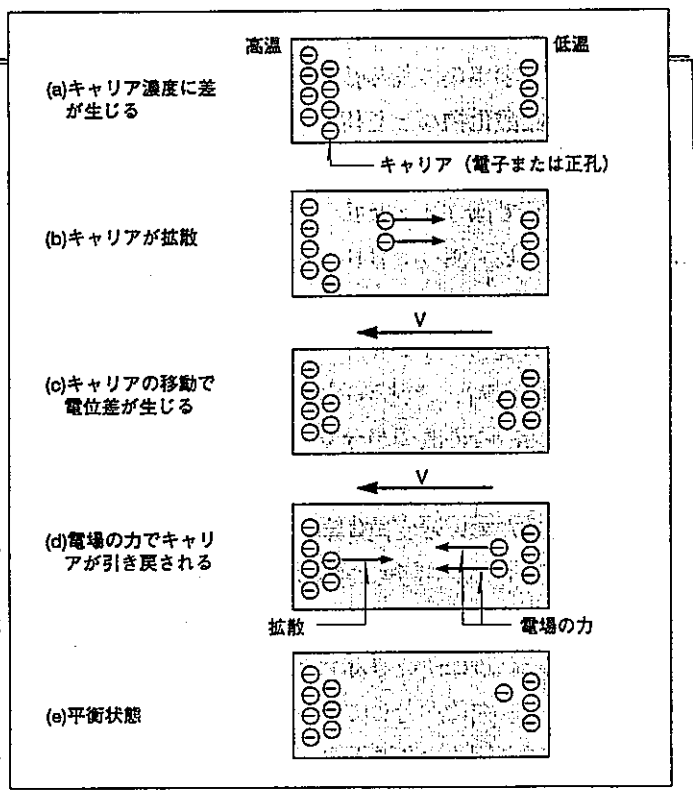
[図3] タービンを熱電変換モジュールに置き換えた高速増殖炉。電力中央研究所が発電システムにおける熱電変換モジュールの有効性を検討するために考えたもの。ヒートパイプを一体化した熱電変換モジュールに360個の熱電変換素子を取り付ける。こうした熱電変換モジュールを約4100個設置し、熱出力150MWの超小型高速増殖炉から27MWの電力を発電。タービンを使った場合に必要とされていた中間熱交換器、蒸気発生器、ナトリウム・水反応対策設備が不要になるため、建設費やメンテナンス費が下がる。高速増殖炉ではナトリウムが高温になるため、熱電変換モジュールを使う利点が大い



運ばれるからである。また、電気伝導率 σ とゼーベック係数 α の関係も、キャリア濃度を高くすると σ は大きくなるが α は小さくなるというように相反するところがある。このため、熱電変換素子として使える半導体はごく限られたものとなる。

熱電変換素子の利点は、寿命が長くメンテナンスが不要なこと。宇宙用の発電システムとして人工衛星などに使われているものでは寿命は20年以上と見積もられる。

[図A] 熱電変換の原理。温度差によって生じたキャリア濃度の差によってキャリアが拡散する。これにより、キャリアが低温側に移動して高温側と低温側に電位差が生じる。n型半導体のケースでは低温側に電子が移動するため、低温側が低電位、高温側が高電位になる。従って、低温側のキャリア(この図では電子)の一部が高温側に引き戻される。拡散速度と、電場によって引き戻される速度が釣り合ったところで平衡状態になる。このとき生じている電位差が起電力となる



*性能指数 Z と無次元性能指数 ZT 性能指数 Z は変換効率の目安とされるもの。ゼーベック係数 α の 2 乗に電気伝導率 σ を掛け、さらにそれを熱伝導率 κ で割った値。無次元性能指数 ZT は性

能指数 Z に温度 T を掛けて無次元化したもので、こちらも効率の目安となる。 $ZT=1$ は Pb-Te や Bi-Te などの高変換効率の熱電材料を超えるもので、一つの目標。

は、確認された埋蔵量が約 4 万 t と希少な資源である。しかも「Te は酸化物や硫化物としては存在せず、銅精錬の副産物として生産されるもので、年間 300~400 t しか生産されていない。そのうえ、熱電変換素子の材料となる純度 99.99% のものはその 10% の年間 30~40 t と限られている」(コマツエレクトロニクス技術部素子グループ部長の木林靖忠氏)。

木林氏は「このままでは量産化による低コスト化にも限界がある」と指摘する。100円/W を実現するには、現状のものより豊富で低コストな材料を使った熱電変換素子の開発が必要になるかもしれない。

現在、九州大学総合理工学研究所材料開発工学専攻の荒井弘通教授らは亜鉛酸化物などを利用した熱電変換素子の研究を進めている。豊富で低コストな亜鉛を主な材料として使っており、熱電変換素子の低コスト化という点では魅力的。Bi-Te 系や Pb-Te 系に比べると、変換効率が低いのが難点で、この改善が今後の課題である。

最近盛んに進んでいる変換効率の向上のための研究は、こうした低コストな熱電材料の高効率化の指針になる。今後、これらの研究を低コストな熱電材料の研究に融合していけば、資源の問題を解決することも不可能ではないだろう。

傾斜機能化で素子効率 20% に

モジュールの変換効率の向上を狙って現在盛んに行われているのが、素子そのものの変換効率を上げる研究である。既存材料の改良と新しい熱電材料の探求によって変換効率の向上が図られている。

既存材料の改良で注目すべき第 1 の方法は、熱電変換素子の傾斜機能化。航技研などが科学技術振興調整

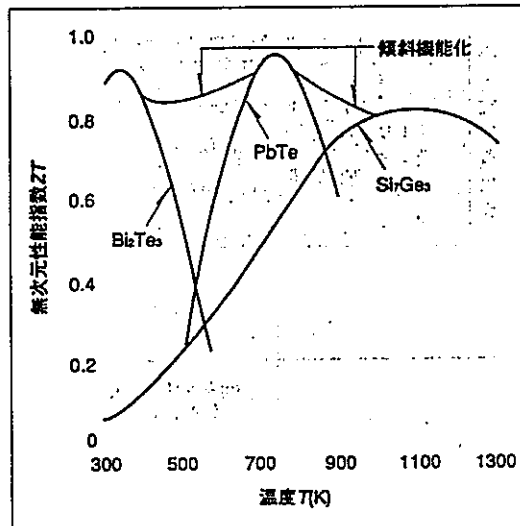
らである。この点は、熱電変換素子の変換効率の増減の目安となる無次元性能指数 ZT^* に注目すれば明らか。既存の高効率の熱電変換素子ではこの ZT の温度特性が図 4 のように山の形になる。

従って、実際に熱電変換素子の低温側と高温側にある温度差を付けて使用する場合は、変換効率が低い温度領域も使わなければならないため、平均の変換効率が下がる。

この平均の変換効率の低下を防ぐために考えられたのが素子の傾斜機能化。熱電変換素子の内部では高温側から低温側にかけて温度が徐々に低下する。温度変化に合わせて素子の各部分で性能指数 Z^* の値がピークを示すように組成を変化させることができれば、熱電変換素子の有利な温度領域だけを使えることになる。

ポイントは Z のピークをどう変化させるかということである。代表的な方法が、不純物の濃度を変えることにより同一の熱電材料のキャリア濃度を変化させるというもの。航技研の新野氏によれば、熱電材料はキャリア濃度を変化させることで Z のピークを図 5 のように変化させられる。

もう一つの方法は Z のピークの異なる熱電材料を熱の流れの方向に直列に積層するもの。 Z のピークが素子内部の温度変化に沿うように、ピークが高温域にある材料は素子の



[図 4] 代表的な熱電材料の無次元性能指数 ZT 。限られた温度領域だけで良い値を示す。傾斜機能化によってこれを改善する取り組みが出てきている

費による生活・社会基盤制度研究プロジェクト「傾斜構造形成によるエネルギー変換材料の開発に関する研究」の一環として取り組んでいるほか、ダイキン工業と電力中央研究所が共同で研究中。

傾斜機能化によって変換効率が上がるのは、均一組成の熱電変換素子の変換効率が温度によって変化し、通常は特定の温度でピークとなるか

*熱電子変換素子 高温にすると熱電子を放出するレニウムなどをエミッタ（電極）とし、熱電子を受け取りやすい酸化タングステンなどで作ったコレクタ（電極）と

向かい合わせ、両電極の間にセシウムガスなどを充てんしたもの。エミッタを高温にすると、エミッタからコレクタに熱電子が移動し、電流が流れる。

*超格子構造 組成の異なる2種類以上の材料の、薄膜結晶を積層したもの。1層の厚さは0.1 nmから数百 nmと言われる。

高温側に、低温域にある材料は素子の低温側に配置する。

以上二つの方法は両立する。航技研などの上記のプロジェクトチームはSi-Ge系、Pb-Te系、Bi-Te系の各熱電材料をそれぞれ傾斜機能化したうえで、高温側から3段に積層した熱電変換素子を設計。高温側を1100 K、低温側を300 Kとした場合、設計値ではあるが、熱電素子の変換効率を20%まで上げた。

また、同プロジェクトではSi-Ge系のさらに高温側に熱電子変換素子*を配し、熱電子変換素子と熱電変換素子を用いたハイブリットの熱電変換システムを設計した。2000~1100 Kでは熱電子変換素子を用い、1100~300 Kでは熱電変換素子を用いて熱を電気に変える。両素子全体としての変換効率は設計値で40%と高く、宇宙基地での発電システムとして期待される。

一方、ダイキン工業と電力中央研究所は共同で、Pb-Te系とBi-Te系の2種類の熱電材料を積層した熱電変換素子を設計。傾斜機能化したのは両熱電材料のキャリア濃度と接続部の組成。理論的な変換効率は780~315 Kで活用した場合の設計値で12%という。

Zを飛躍的に改善する技術も登場

既存材料の改良でもう一つ重要なアプローチは、超格子構造*を利用

してZを飛躍的に高めるという取り組みである。米マサチューセッツ工科大学(MIT)、ダイキン工業、通産省工業技術院電子技術総合研究所などがこのような研究を進めている。

ダイキン工業電子技術研究所所長の平野徹氏によると、「この方法を使えば熱電材料のZを100%以上向上させられる可能性がある」とい

の低い電子をその障壁の中に閉じ込める。狙いはキャリアの平均エネルギーを増大すること。障壁でエネルギーの低い電子や正孔がキャリアになるのを妨げ、エネルギーの高い電子や正孔のみをキャリアにする。キャリアの平均エネルギーが増すと、ゼーベック係数 α が大きくなるので、 α の2乗に比例するZが大きくなって変換効率が上がる。

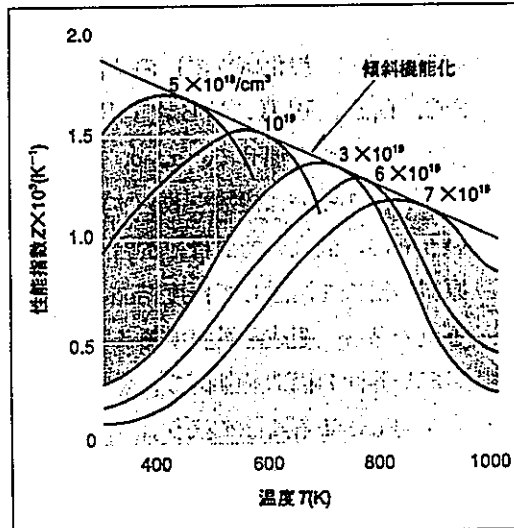
MITとダイキン工業の取り組みの違いは薄膜の積層方向にある。MITの構造が電極に垂直に薄膜を積層するのに対して、ダイキン工業は電極に水平に薄膜を積層する。

スクッテルダイト構造で14%へ

新材料の探求では、様々なアプローチにより成果が出てきている。このうち一つは新しい熱電材料として注目されているスクッテルダイト構造の化合物の中から、より変換効率の高い材料を見つけ出す取り組み。山口東京理科大学の松原教授のグループが成果を上げている。

スクッテルダイト構造の化合物とは図6のような結晶構造を持つ。共有結合性が高いため、キャリアの移動度*が高い。松原教授らはこのような構造を持つCoSb₃のCoの一部をPdに置換することによって、300~800 Kの広い温度領域でZを約10³/Kに上げることに成功した。

その材料は(Co_{0.97}Pd_{0.03})Sb₃の



[図5] キャリア濃度と性能指数の関係。曲線の上に記した値がキャリア濃度。キャリア濃度を変えることで性能指数Zがピークとなる温度を調整できる

う。「傾斜機能化はZを30%向上できれば良いところ」(平野氏)なので、この方法は傾斜機能化の一步先の技術という位置づけになる。

この方法は簡単に説明すると、熱電材料と絶縁材料の互いの薄膜を交互に積層することにより、超格子構造を作るというもの。量子井戸やトンネル効果によって、電子に対してエネルギー的な障壁を作り、エネルギー

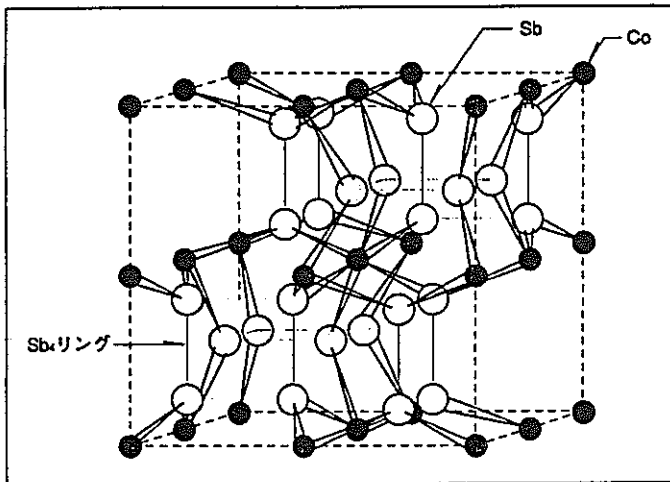
【開発設計】

*移動度 固体中を移動するキャリアの速度。性能指数 Z を上げるには電気伝導率 σ を上げるのが一つの方法。 σ はキャリア濃度 n と移動度 μ に比例している。

ただ、 σ を上げるために n を上げると、ゼーベック係数 α が小さくなるため、 Z を上げられない。従って、 μ を上げて σ を高めることが必要とされている。

*重フェルミ粒子半導体 電子と電子の相互作用が強く、固体中のキャリアが通常の半導体の何倍もの有効質量を持っているかのよう

な挙動を示すもの。ゼーベック係数 α が大きいのが特徴。



【図6】スクッテルダイト構造の例。共有結合性が高く、キャリアの移動度が高い

多結晶体である。 Z が大きいうえに、フラットな特性を示す点が重要。松原教授によると、「(素子の変換効率で) 14~15% を達成できる可能性がある」。

材料組織の制御で ZT を1以上に

材料を複合化して材料の組織や界面の構造を制御し、変換効率の高い新たな熱電材料を作り出す取り組みもある。東北大学金属材料研究所の平井敏雄教授のグループや山口東京理科大学の松原教授のグループなどがこうした研究を進めている。

熱電変換素子の変換効率は、ゼーベック係数 α と電気伝導率 σ が大きく、熱伝導率 κ が小さいほど大きくなる。ただ、これらの条件は相反するところがある。そこで、自然界から見つけ出すのではなく、条件を満たすものを作り出そうというのがこの取り組みだ。

平井教授らの研究の一つは、1000 K以上の高温域で熱電材料として

有望なB₄C(炭化ホウ素)の基材に、SiC、B₄Si、W₂B₅、WB₄、TiB₂などのうち一つを混ぜて、 α 、 σ 、 κ のいずれかあるいは複数を改善するというもの。最大の特徴は、混合した原料の粉末を溶融して再度結晶させる点である。組成を調整することで、組織や界面の構造を制御し、熱電性能を向上させることを狙う。

例えば、SiCを混ぜたケースでは、B₄Cに対するSiCの割合を40 mol%に調整することにより、B₄Cの粒状組織の周囲にB₄CとSiCの層状の共晶組織を析出させることができた。このような組織にすると、100~300 μ V/Kだった α が約1000 Kで700 μ V/K以上にまで高まったという。

また、B₄Siを混ぜたケースでは、組成を調整してB₄Cの結晶の周りにB₄Siの結晶を析出させることができた。組織は全体としてB₄Siが網の目のようにつながった格好になり、 σ が上がったという。

残念ながら、組織や界面の構造と α 、 σ 、 κ の物性値の関係は理論的には分かっていない。しかし、平井教授らはこうした方法を用い、B₄Cに6 mol%のTiB₂を混ぜた複合セラミックスで、約1000°Cでの無次元性能指数 ZT を1以上に高めることに成功した。

一方、松原教授らは、熱電材料の一つであるFeSi₂の微粒子に、SiやGe(ゲルマニウム)をコーティングすることでキャリアの移動度を上げられることを確認した。直径1~3 μ mのFeSi₂の微粒子に、SiH₄やGeH₄などのガスを入れて高周波コイルでプラズマ化するというもの。キャリアの移動度が0.4~3 cm²/V・sのFeSi₂に1000 cm²/V・sのSiや1600 cm²/V・sのGeが付くため、キャリアの移動度が上がる。

移動度は電気伝導率と比例関係にある。この研究は、電気伝導率を選択的に改善する方法として期待できる。

このほか、高変換効率を実現できそうな新しい熱電材料としては、(Ce_{1-x}La_x)Ni₂、(Ce_{1-x}La_x)In₃、CePd₃などの重フェルミ粒子半導体*や、YB₆のように単結晶でガラスと同じくらい低い熱伝導率を持つフォノンガラスという材料が注目されている。

傾斜機能化で熱膨張の差を吸収

素子そのものの変換効率の向上と並んで実用化のカギを握っているの

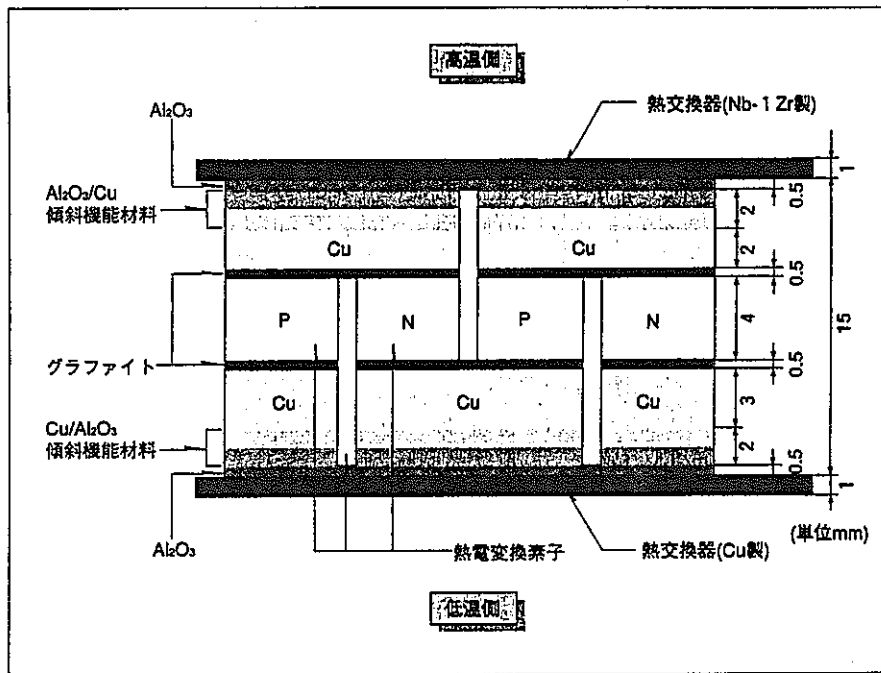
が、熱電変換モジュールの実質的な出力の向上と使い勝手の改善である。

電力中央研究所は、ダイキン工業が設計した前述の変換効率約12%の素子から、効率的に電気を取り出す研究を進めている。具体的には、熱電変換素子と熱交換器を接合する技術。同じ熱源からより大きな電力を取り出すための技術である。

熱電変換モジュールでは、素子の一端に熱源からの熱流を伝え、もう一端を冷却してやらなければならない。モジュールから取り出せる電力は、素子の両端の温度差をどれだけ大きく保てるかで決まる。温度差を大きくするには素子の高温側に取り付けられた電極に熱源や熱交換器を密着させることが理想だが、両端の電極を熱交換器などに固定すると、高温側と低温側の熱膨張差によってモジュールが界面で破壊される。

電力中央研究所は、こうした熱膨張の差を吸収しながら電極と熱交換器を接合する技術を研究している。電極と熱交換器を傾斜機能化した材料によって熱応力を緩和しながら接合するもので、この接合方法を同研究所ではコンプライアント・パッドと呼んでいる。現在はコンプライアント・パッドを組み込んだ熱電変換モジュールの設計を終了した段階。計算では同一の熱源から10倍の電力が取り出せ、モジュールの変換効率は約10%に達する見込みという。

設計したモジュールは図7のように、高温側と低温側の二つの熱交



【図7】電力中央研究所とダイキン工業が共同で設計した熱電変換モジュール。計算ではモジュールの変換効率は約10%。熱電変換素子と熱交換器の接続に傾斜機能材料を使い、熱応力を緩和している

換器と熱電変換素子を、グラファイト、Cu(銅)電極、CuとAl₂O₃(アルミナ)の傾斜機能材料、Al₂O₃で接合したものである。Al₂O₃は絶縁材料で、Cuで直列接続した熱電変換素子が短絡しないように入れてある。

ポイントは比較的軟らかい金属のCuでモジュール全体の熱応力を緩和するとともに、CuとAl₂O₃を傾斜機能化して接続することで熱交換器に固定したAl₂O₃とCuの界面での破壊を防いでいることである。また、Cuと熱電変換素子の間にグラファイトを入れ、高温状態でCuが熱電変換素子の中に拡散しないように対策を講じた。

こうしたコンプライアント・パッ

ドのヒントになったのが、米国の原子炉衛星「SP-100」に搭載された熱電変換システム。この熱電変換システムでは、Nb(ニオブ)のファイバを使ったブラシ状のパッドで、熱膨張の差を吸収していた。

また電子技術総合研究所は、Bi-Te系の熱電変換素子のへき開性を改善し、機械的な強度を向上できる製造方法(PIES法)を開発した。ボールミルで原料を粉砕混合し、焼結するというもの。約480°Cで1時間熱処理する。従来のように原料を溶解し、約800°Cで数百時間かけてインゴットを引き上げる方法と違い、低コスト化と、機械的な強度の向上による使い勝手の向上が見込める。(富岡 恒憲)

ガスクラスレートエンジンの提案*

西村 肇・守田 和裕

本報告は、低温度の熱源を動力に転換する新しいシステムを提案するものである。作業流体としてガスクラスレートを用いるのが特長である。熱機関の作業流体として今まで多くのものが提案されているが、ガスクラスレートを作業流体に用いようという提案は今までになかった。

以下、このようなシステムの必要性、その原理と効率、その意義と問題点について述べる。

必要性、用途

オイルショック以来、化学工場では省エネルギー化が進んでいる。省エネルギー化の主流は廃熱の有効利用であるが、このような努力の結果、代表的なエチレンプラントでは今や残された廃熱は120°C~130°C以下の熱ばかりであるといわれている。ただしその熱量は大きい。これに対し、このような低温度の熱エネルギーの需要はすでに飽和しているため、これを有効に利用するためには、これを温度を高めるかまたは動力に変換しなければならない。低温度エネルギーの動力への変換は、化学プラントの今後の省エネルギー戦略の上でもっとも重要な課題となっている。しかしながら、現在このための有効な技術的手段がない。フロンターピンは実用されているが、有効な使用範囲は130°C以上と言われ、十分にこの目的には合致していない。もっと低温度の熱源で有効に働く熱力学サイクルと作業流体が望まれる。

もう一つのニーズは、動力を用いずに低温度の熱源だけで動く冷凍機である。開発途上の今後のエネルギー需要の増加を考えると、その大きな要因の一つは冷房の

普及であると思われる。これに対し、もし太陽熱だけを利用して冷房が可能ならば、エネルギー経済の上から非常に望ましい。現在、吸収冷凍器を用いた太陽熱冷房の実用化が進められているが、低温度熱源だけを用いて、もっと低い温度、つまり深冷をえる方法が望まれる。

ここに提案する方法は、これらのニーズにこたえるものである。

クラスレートに関して

包接化合物とは原子または分子が結合して形成された3次元構造の内部に適当な大きさの空孔があり、その中に他の原子または分子が一定の組成比で入り込み、特定の結晶構造を形成している物質のことである。前者の骨組を形成する分子をホスト、後者の取り込まれる分子をゲストと呼ぶ。ゲストが特に気体であるガスクラスレートを本研究では利用する。気体包接化合物の主な例を表1に示す。この化合物の特徴は、分解圧力が温度により非常に大きな影響を受けることにある。(図1参照)クラスレートの分解平衡曲線の傾斜は、気体の断熱曲線よりも相当に、勾配が急である。このことは、低温度差で大きな圧力差を得られることを意味し、仕事取り出しの際

表1 ホスト分子とゲスト分子の結合例

Host Molecule	Guest Molecule
H ₂ O (water)	Ar, CH ₄ , Kr, CF ₄ , Xe, N ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , CO ₂ , CH ₃ F, H ₂ S, ASH ₃ , C ₂ H ₆ , H ₂ Se, Cl ₂ , C ₂ H ₂ F ₂ , C ₂ F ₄ , CH ₂ Cl ₂ , SbH ₃ , SO ₂ , C ₂ H ₅ SH, ClO ₂ , C ₂ H ₅ I, CH ₃ Br, CHCl ₃ F, C ₂ H ₅ Cl, C ₂ H ₅ Br, CHCl ₃
C ₆ H ₅ OH (phenol)	HCl, HBr, HI, H ₂ S, CS ₂ , H ₂ Se, Xe, CO ₂ , SO ₂ , CH ₃ Br, Cl ₂ , Cl ₂ , C ₂ F ₄ , C ₂ H ₆ F ₂
(hydroquinone)	SO ₂ , CO ₂ , O ₂ , HCl, HBr, H ₂ S, C ₂ H ₂ , Kr, Xe, N ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
(cyclodextrin)	Cl ₂ , Br ₂ , I ₂ , Kr, Xe, O ₂ , CO ₂ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₆



Hajime Nishimura (正会員)

昭和32年3月東大・工・機械工科学科卒、34年3月東大・化学工学修士修了、34年4月航空宇宙技術研究所、36年4月東大・工・化学工学科助手、41年同助教授、55年同教授、主な著書：化学プロセス工学(九巻)、環境と経済を含めた総合アセスメント(武蔵野書房)など



Kazuhiro Morita (正会員)

昭和54年3月東大・工・化学工科学科卒、56年3月東大・工学系大学院化学工学専門課程修了(修士)、56年4月三菱重工業(株)入社、化学プラント事業部化学プラントエンジニアリングセンター(MCEC)勤務

* 昭和56年8月19日 受理
Gas Clathrate Engine: A New Invention
化学工学協会第46年会(1981年4月、名古屋)にて講演

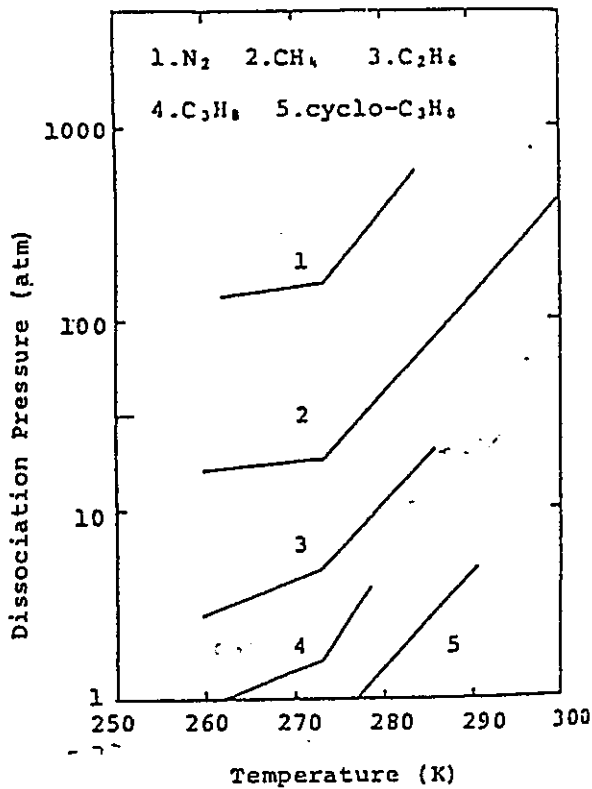


図1 ガスクラスレートの分解圧

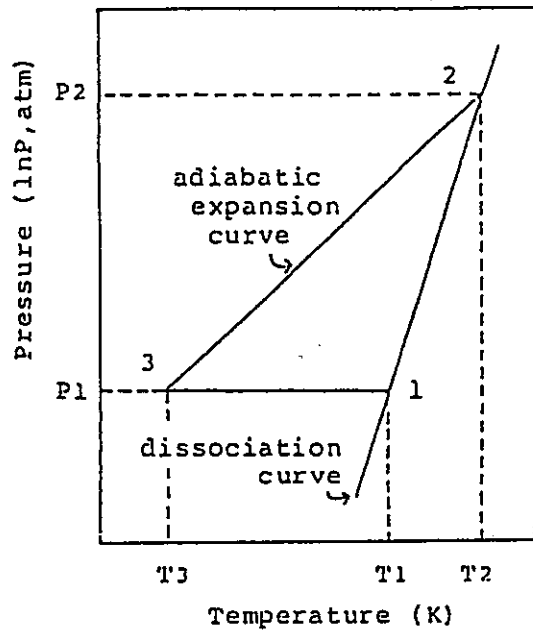


図2 ガスクラスレートエンジンの熱力学サイクル

ので3→1の変化において、冷凍源として用いることも可能である。このサイクルをメタン-水系クラスレートによって、280 K~300 Kの温度範囲で動作させた場合

の諸量は以下ようになる。(ただし、組成は $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ とし、1モルのクラスレートを1サイクル回した時とする。)

$$\begin{aligned} T_1 &= 280 \text{ K} & T_2 &= 300 \text{ K} \\ T_3 &= 165 \text{ K} & P_1 &= 50 \text{ atm} \\ P_2 &= 500 \text{ atm} \end{aligned}$$

クラスレート形成時の冷却熱

$$Q_1 = 14.9 \text{ kcal}$$

クラスレート分解時の加熱量

$$Q_2 = 15.9 \text{ kcal}$$

断熱膨張時の仕事可能量

$$W_1 = 0.83 \text{ kcal}$$

冷凍源にした時の冷却量

$$W_2 = 0.99 \text{ kcal}$$

熱-仕事の変換効率

$$\epsilon = W_1/Q_2 = 0.0522$$

(cf. Carnot 効率=0.0667)

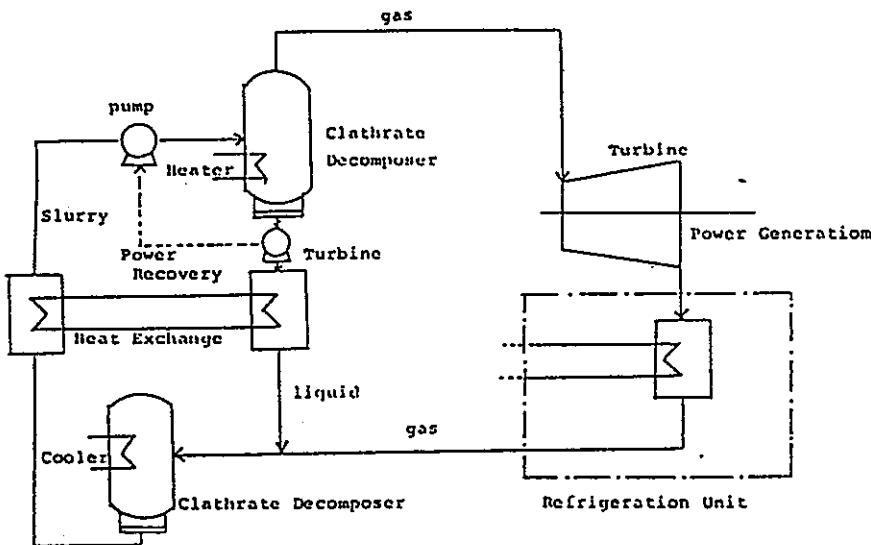


図3 ガスクラスレートエンジンのフローシート

のタービンの機械効率を高めることを可能とするだろう。

プロセスの提案

本研究の提案プロセスで用いる作動流体としてのガスクラスレートの状態変化は図2のようになる。状態1 (温度 T_1 , 圧力 P_1) においてクラスレートの形成、状態2 (T_2, P_2) で分解を行なう。2で分離した気体は2→3において断熱膨張させ、ここで仕事を取り出す。状態3 (T_3, P_3) において、 T_3 は T_1 よりもかなり低温になる

上記原理を実現させるプロセスとして、クラスレートの形成と分解を同一の容器内で行なうバッチ式と、別々に行なう連続式とが考えられるが、連続式の例を図3に示す。クラスレート形成器が状態1、分解器が状態2、タービンが2→3の変化に、冷凍利用が3→1に相当する。クラスレート分解器に入るスラリーと分解器から出て来る液との間では動力回収および熱交換が必要である。図3の例では、水もガスもクローズドループになっているが、ガスをオープンループにしてガス自身を深冷させたり、または液化させて取り出すサイクルも考えられる。

これはメタンガスの液化などに利用できる。

この方法の意義

ガスクラスレートを一エネルギー変換プロセスに用いる第一の意義は、機械的な圧縮機を用いずに小さい温度差の熱エネルギーだけを用いてガスの強い圧縮が可能になることである。機械的な圧縮機に対し、化学的な圧縮機と呼ぶことができよう。化学的なガス圧縮法としては、従来から液体への吸収あるいは固体への吸着を利用する方法があるが、クラスレートをを用いる方法は次の点でこれらよりすぐれていると考えられる。まず、固体への吸着法との比較であるが、ガスクラスレートと木は、微細粒子のスラリーを形成しているため、固体に比べ伝熱速度が格段に大きく、ガスの取込み、放出がすみやかに行なえる。次に液体への吸収法との比較であるが、クラスレートは結晶格子の空孔の中にガスを直接閉じ込めるため、液体単位質量当りのガスの取込み量が吸収の場合に比べて大きい。また、温度の変化に対する平衡圧力の変化の度合いも吸収に比べて大きく、したがって小さい温度変化に対し、大きな圧縮比がえられることも特長である。

ガスクラスレートの分解平衡圧曲線が断熱膨張曲線より立っている結果として、動力発生サイクルと冷凍サイクルを一つのシステムにまとめられることもこの方法の大きな特長である。これによって結果的には動力発生、冷凍発生の各部分の効率を向上させている。

従来の作業流体がほとんどすべて純物質であったのに対し、ガスクラスレートの場合は、ホスト分子とゲスト分子の組合せであることも大きな特長になっている。第一に、ガスクラスレート分解器で作業流体からガスが分離される。これが理想気体に近いため、湿り範囲に入る恐れなしにタービンで膨張させることができる。普通の作業流体では、えられた蒸気をよほど過熱しないかぎりたちまち湿り範囲に入ってしまう、このような大きな膨張はできない。つまり、分解器で水とガスに分離したのは、蒸気の過熱したことと同じ効果をもつ。作業流体が液とガスの組合せであるための第二の特長は、ホスト分子、ゲスト分子の組合せをかえることによって、必要に応じて多様な作業流体を作り出せる可能性をもっていることである。

ガスクラスレートエンジンはこのようにいくつものすぐれた性質をもった有望なシステムであるので、この方式の実用化研究がすみやかに進むことを望みたい。

書評

高分子学会編

化学者のための数学

東京化学同人 (1981年10月刊)

¥ 4,200

物理化学や生物化学など異なる学問領域が結び合って優れた成果が得られてきた歴史を踏まえて、数学と化学の結びついた領域から画期的なものを生み出したいという野心的な考えから、化学数学あるいは数理化ともいべき分野の教科書として本書が編集されている。

内容は座標変換、行列、常微分方程式、差分方程式、複素積分、フーリエ変換、ラプラス変換、母関数、確率分布、ベクトルとテンソル、球およびベッセル関数、全微分と偏微分、偏微分方程式、グリーン関数、群論と15項目にわかれ、それぞれく数学手法と化学への応用が書かれている。数学が化学の研究にどのように役立つかを一通り概観することができる。

しかし、すぐわかるように、どの分野も僅に一間の数学教科書になり得る項目である。それを、それぞれ10から20頁程度で説明しているわけであるから、これを読んでフーリエ変換がわかった、群論が使えるということには到底なり難い。また著者は化学が専門の人が大部分であり、数学的記述にあたっては何らかの教科書から記述を借りてこざるを得ない。したがって、本書は化学の研究における数学の利用分野と、その適用方法を知るための案内書であり、その意味において多数挿入されている化学数学に関連した埋草の効果もあって、気軽に通読できる本として推薦できる。(吉田邦夫)

メタンハイドレートに関する 海外の研究開発動向

寺崎 太二郎*



1. はじめに

メタンハイドレートとは、水分子とメタン分子とからなる氷状の固体物質である。これは、複数の水分子が籠状の格子を作って配列し、そこにできた空隙中にメタンが取り込まれたもので、この時のメタン分子と水分子の数の比は1:5.75になる。一般に低温ほど、また高压であるほど生成し易い。地球上では、極地方、あるいは深海の海底下がこの条件を満たす。例えば、シベリアやアラスカの永久凍土地帯や、ペルー・チリ海溝、中央アメリカ海溝等の深海域がこれに当たる。その量は炭素量として 10^{19} g (Kvenvolden 1993) を越える程で、これは世界の在来型天然ガスの確認埋蔵量と比較してはるかに大きなものである。

そもそもガスハイドレートが注目され始めたのは、天然パイプラインの閉塞トラブルが、ガスハイドレートによるものであるという報告(1934)が出たことで、ガスパイプライン中に水が混入すると、低温高压という条件下でガスハイドレートが形成されることが知られるようになった。シベリアの化学プラントで閉塞トラブルが頻発していたため、その対

策上、研究が進展した。その後、1960年代にシベリアの凍土の下から現実にメタンハイドレートが発見され、さらに海域の地震探査から世界各地の大陸縁辺の海底下に広く賦存している場所のあることがわかってきた。

日本でも近年、南海トラフ、奥尻海嶺、十勝・日高沖、網走沖、西津軽海盆等でその賦存が確認され、メタンハイドレートに対する関心が高まっている。その推定賦存量は合計約6兆 m^3 といわれており、これは炭素量として約 3×10^{14} gになり、国内における天然ガス年間消費量の約百倍に相当する。資源が乏しい我が国としては非常に魅力のあるエネルギー資源といってよい。

今後、これをエネルギー資源として実際に開発・利用していくためには、ガスハイドレートの基礎的な性質(生成、分解、安定性、物性)の研究、探査技術、生産技術(掘削技術、開発技術)の確立、経済性評価等これから為すべきことが多くあるが、日本としては、まだ研究開発の緒についたばかりといってよい。

今回、限られた範囲ではあるが、ガスハイドレートの研究では世界的にみてもトップレベルにある米国およびカナダの諸研究機関を

* (財)エネルギー総合工学研究所 主管研究員

訪れ、彼らの研究開発動向を調査した。

2. 米国の研究開発動向

米国はアラスカ凍土地帯、及び大西洋岸や太平洋岸縁辺部のようなメタンハイドレートが賦存している広大な地域を有しており、各方面の関心をよんでいる。例えば、資源としての面からはエネルギー省 (DOE) が、軍事的な利用面からは海軍 (US Navy) が関心をもっているようである。しかし、在来型の天然ガスがまだまだ多量にあるためか、現在は主に地質学的な面から探査・研究が進められており、その活動を担っているのが地質調査所 (US Geological Survey) である。そこで、今回はこの地質調査所を訪れた。

2.1 地質調査所における探査・研究

米国の地質調査所は、内務省に属する組織で、管理部門のほか、水資源部門、地質部門、マッピング部門の四つの部門より成り、職員数は全体で約1万人に及ぶ大きな組織である。本部はバージニア州レストンにあるが、支所の方は各部門が横断する形で組織されて

おり、国内各地にある。メタンハイドレート関係の調査・研究についてみると、太平洋の海洋環境関係はカリフォルニア州メンロパークにある支所が、大西洋の海洋環境関係はマサチューセッツ州ウッズホールにある支所が、そして資源関係はコロラド州デンバーにある支所が各々担当している。

(1) 太平洋海洋地質課

サンフランシスコ南の緩やかな丘陵地にメロンパーク支所があり、その中に太平洋及びアラスカの地質学研究を担当する太平洋海洋地質課がある。ここでやっている研究は、(1) Environmental Marine Geology, (2) Coastal Marine Hazard, (3) Sea Floor Resources, (4) Data Baseの4分野にわたっている。海洋資源については、主にマンガン、コバルトクラスト、熱水鉱床に関する研究を行っており、現在は、特に開発における環境影響評価に関する研究に力を入れている。これは他所にもいえることであるが、近年、米国においては環境関連テーマに研究費が付きやすいためか、ここでも海底環境やメタンと地球温暖化の関係など、環境問題に研究がシフトしてい

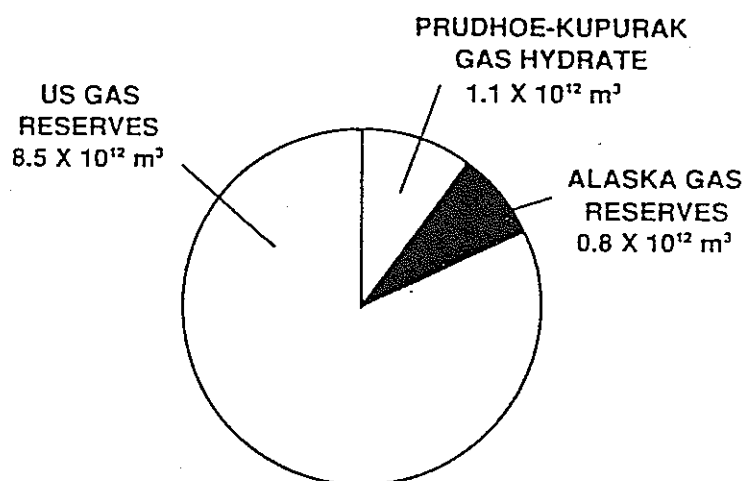


図1 米国における天然ガス埋蔵量 (Kvenvolden [1993])

るようである。

メタンハイドレートの研究は、地質学的研究面の第一人者といえるDr. Kvenvoldenが中心となって少人数で行っている。主として学術的な観点より研究が進められているようで、現在は地質学的災害あるいは地球規模の気候変化という点から、太平洋・アラスカのメタンハイドレートの研究を行っている。なお、メタンハイドレートを資源として捉えた研究は、前述のようにデンバー支所でDr. Colletが主体となって行っている。

Dr. Kvenvoldenは、世界各所で行われているメタンハイドレート探査研究の最新情報をもとに総説を著しており、その中で賦存量の推定を行うとともに、ハイドレートの世界的分布図をまとめている。図2は1993年に出したもので、前回発表のもの(1988年)と比較すると、新たにアメリカ大陸縁辺部、南極大陸縁辺部、アリューシャン列島周辺、ロシア

のバイカル湖など十数箇所が追加されている。

太平洋地質課としては、従来使用していた調査船が廃船になって以来、しばらく海洋調査が停滞していたが、海軍の船を改造し、グロリアやシーマーク等の近代調査機器を装備した全長70mの新調査船が93年11月に就航することになっており、今後調査活動が活発になると思われる。

対外的関係についてみると、92年に行われたソ連の調査船によるオホーツク海の調査航海に研究者を派遣しており、これにはカナダからも参加者があった。本調査は、研究所としての公式の共同研究ではなく、あくまでも研究者レベルでの一時的な研究交流として行われたものである。この調査航海では、サハリン東方の水深500m以深の海域でグラビティーカーによりハイドレートを採取しており、同課はサンプル中のガス分析にかかわる

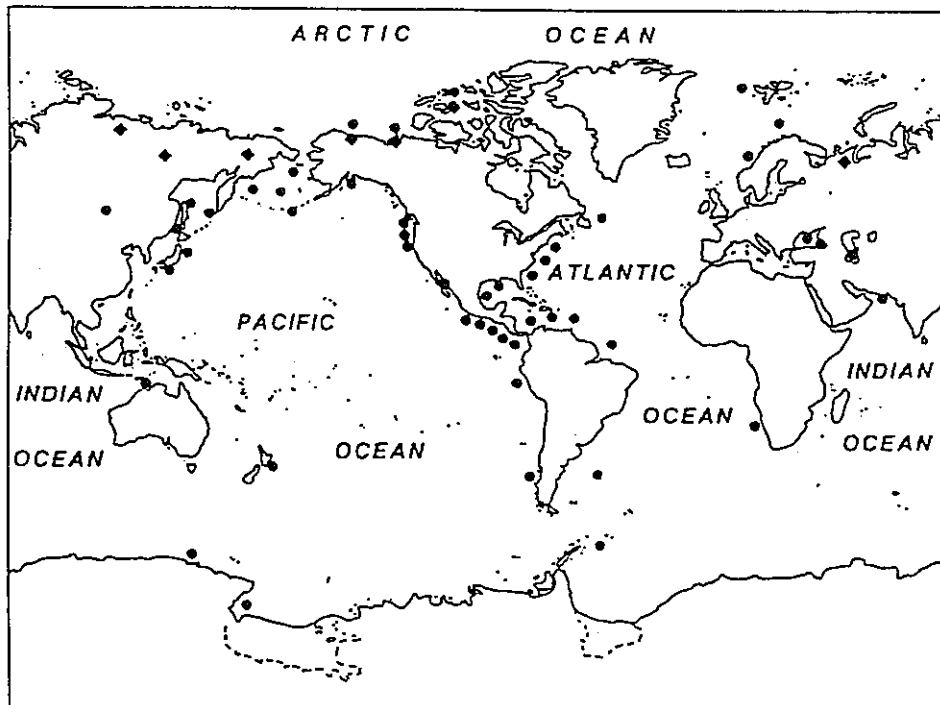


図2 メタンハイドレートの世界的分布 (Kvenvolden [1993])

- 海洋性(水性)堆積層中
- ◆大陸(凍土)域

研究の一部を分担した。

(2) 大西洋海洋地質課

ボストン市から東南約100マイルの所にウッズホール支所があり、その中に大西洋の海洋地質学研究を担当する大西洋海洋地質課がある。研究施設は閑静な森に囲まれており、車で5分程の距離の湾周辺にも海洋関連の研究施設があり、湾内には大きな調査船が繫留されている。

ウッズホールにおけるメタンハイドレートの研究は、Dr. Dillonが中心となって5～6名で行われている。

Dr. Dillon達の主な研究として、大西洋岸大陸縁辺部における地震探査法による地図作成が挙げられる。これによって、大西洋岸大陸縁辺部にはメタンハイドレートが広範囲に存在することがBSR (Bottom Simulating Reflector) から確認されている。特に水深700m近辺の海底にハイドレートの存在する場所が広く分布していることがわかってきた。これら海洋ハイドレートの探査は、深海が対象とはいえ、海底下の探査距離は比較的短いと

いえる。このため、通常の探査では、160inch³のエアガンが用いられるが、Dr. DillonらのBSRの測定では5 inch³のエアガンが使用されているようで、これによって解像度の高い探査データを得ている。

対外的な共同調査としては、バイカル湖の地質調査が挙げられる。これはミシガン大学等いくつかの米国の大学、及びロシアの科学アカデミーと共同で行っているものであり、89、92年に実施した物理探査データからBSRが確認された。それによれば、湖の中央盆では水深1,500m以深の湖底下250～500mに、南盆では水深1,000～1,450m以深の湖底下200～325mにBSRが分布しており、両盆の間にあるセレンゲデルタにもBSRが見られた。バイカル湖には、北モンゴルに端を発するセレンゲ川が流れ込んでおり、これによってもたらされた有機物質がガスハイドレートの成因になったと考えられている。

以上のような探査活動に加えて、Dr. Dillonらは調査データをもとに、メタンハイドレートの賦存量を推定するため、BSRの強さに

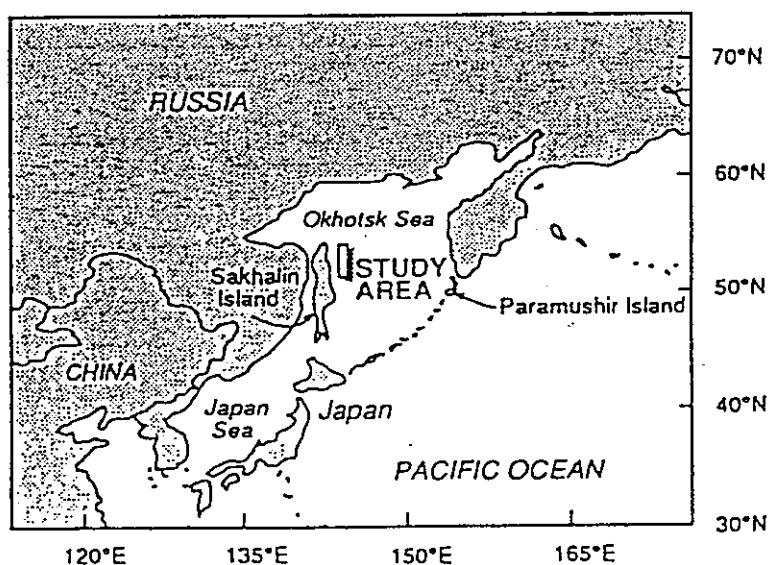


図3 サハリン東部オホーツク海調査区域

よって、海域を3階級に分け、階級別に対象海域のハイドレート量の推定を行うことを試みている。その際、対象海域における堆積層中のハイドレート、水、岩石の存在割合を知る必要があるため、彼らはハイドレート層の速度解析から時間平均式 (Time Average equation) によって推定するような工学的方法を適用している。海域全体のハイドレート量は、海域面積、ハイドレート層の厚さ、ハイドレートや水の存在割合等より求めようというものである。彼らはこのような方法により大西洋岸大陸縁辺部におけるメタンハイドレート賦存量の推定を行おうとしている。

さらに彼らは、このような賦存量推定に必要な物性データを得るために、ガスハイドレートの生成・分解実験を行おうとしている。

海域のメタンハイドレートは、メタンガスが海底堆積物の間隙中に浸透し、そこに存在

する間隙水に溶解した状態で、ある温度、圧力になった時に形成されると考えられる。その際、堆積物の間隙の大小や海水、堆積物に含まれる化学成分などの様々な要因が生成に影響を与えると考えられる。

これまで研究者たちの多くは、メタン、エタンのような純ガスと水を用い、圧力容器中でガスハイドレートの生成・分解実験を行ってきた。しかし、実際のガスハイドレートは前述のように堆積物の狭い間隙中で、気液両相とも様々な不純物を含んだ状況下で生成や分解が進むので、これまでのような実験結果とはズレがあると考えられる。

彼らの実験装置は、実際の海底堆積物を用いて大陸斜面での温度、圧力の状態とその変化を模擬的に再現出来るシステムで、これによる実験で海底堆積物の間隙率、コアー水ーガス組成、速度等の関係を明らかにすることが可能である。

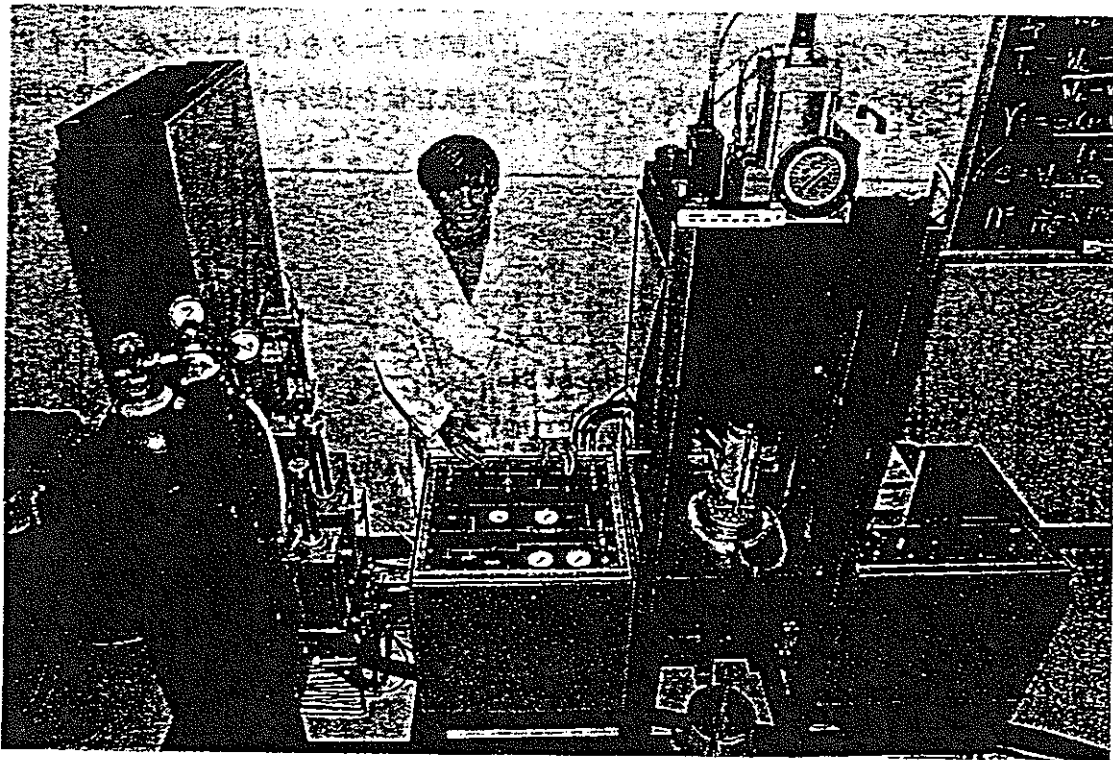


写真1 メタンハイドレート生成実験装置 (USGSウッズホール)

実験装置はコンピュータで制御され、堆積物を収納する円筒形の高圧セルは最高25 Mpa (水深2,500m相当)の圧力を加えることが可能で、温度は±0.2℃ずつコントロールできるものとなっている。通常の実験は、0℃付近で行われ、メタンをはじめとした炭化水素ガスは堆積物中へ浸透するようになっている。

ハイドレートの形成を検知する方法として、日本では光学的方法が用いられているが、この装置では比抵抗と音速を測定して検知するようになっている。また、形成したハイドレートを低温試料室を付けた走査型電子顕微鏡により観察することも考えているようである。当実験装置は、現在最終組立を行っているところであった。

以上のように彼らの研究は、海域におけるメタンハイドレートの地質学的調査ばかりでなく、その物性を調べるための基礎的な実験も並行して行おうというものである。この研究は海域におけるメタンハイドレートの様々な評価を行うための工学的な基礎データをもたらしてくれるであろうと期待される。

3. カナダの研究開発動向

カナダはガスハイドレートの賦存の可能性が高いとされるマッケンジーデルタを含む広大な永久凍土地帯を有し、しかも北極海に面しているため、先進諸国の中でも早くからガスハイドレートに関する探査・研究を行ってきた。メタンハイドレートの物性に関する基礎的な研究は大学が、探査を含めた地質学的な研究はカナダ地質調査所 (Geological Survey of Canada) が、また掘削技術の開発等実用的な面は石油関連産業が中心となって行

われているようである。

3.1 地質調査所における探査研究

カナダ地質調査所は1993年に設立150周年を迎え、我が国の地質調査所とも盛んな交流がある。管理部門の他、地球物理・海洋地質学部門、鉱物・大陸地質学部門に分かれており、ガスハイドレートの探査・研究面では世界的なレベルにある。

メタンハイドレートの研究活動は、北極海、ポーフォート海、西海岸のヴァンクーバー沖、東海岸のノバスコチア周辺等で行われている。ODP (国際深海掘削プログラム) に対して研究分担金を支払い、ヴァンクーバー沖 (米国と共同) やノバスコチア周辺での地震探査データの基本解析やこれらに関する検討に参加している。これらの活動はノバスコチアの大西洋地質学センターやブリッティッシュコロンビアの太平洋地質学センター、オタワにある地質調査所のTerrain Science部門で行われているが、その中心人物はDr. Judgeである。彼は長年、ガスハイドレートに関する研究を行っており、米国のDr. KvenvoldenやDr. Dillonと共にハイドレートに関する地質学的な面からの研究の牽引者である。

彼によれば、カナダにおいて、ガスハイドレートに関する研究が本格的に行なわれるようになったのは数年前のことであるが、これは石油掘削時の安全性の確保や環境保全の観点から取り組んだもので、ガスハイドレートの資源的な評価は行なっていない。カナダ地質調査所では、マッケンジーデルタ、ポーフォート海、東部地区 (ニューファウンドランド沖等) で石油会社や掘削会社等が行った1970年代からのWell logのデータを集め、解

析を行っている。

例えばポーフォート～マッケンジー地域の
ハイドレート探査データによれば、500mより
浅いところには、メタンハイドレート全体の
5%以下しか存在しない。これは気候等の物
理的条件の変化により浅部では簡単にハイド
レートが分解してしまうからである。また、
ハイドレート層は連続して存在しているの
ではなく、60%は厚さが80m以下のものでは
なく、60%は厚さが80m以下のものである。
図4は探査データから作成したハイドレート
が存在する最深度線であるが、地温によるシ
ミュレーションとよく一致している。ただし、
推定では1,400mが最深度となったが、実際
には1,800mであった。図4の影をつけた部分
は推定深さに対して実際には400m以上深か
った場所である。この誤差については、地温
勾配、地殻熱流量等の推定条件が実際と違
うためと思われるが詳細は不明である。

ハイドレートを資源としてみた場合、経済

的観点からの評価も必要であるが、その場合、
回収の容易さから2,000mより浅いところに
どれだけ存在するかが重要となる。BSR等
でポーフォート地域を探査したところでは80
%の場所でハイドレートの徴候があり、深さ
800～900mの所に最も多く存在しているこ
とが確認されている。これらのデータは、94年
に日本で開催される国際海洋極地工学会議で
発表される予定である。

新しい探査技術の開発という点では、水面
が氷で覆われた海域や水域の探査に有用であ
るパーティカル・アレー法という新しい地震
探査法を開発し、実際の調査に適用を試みて
いた。

対外的な活動としては、ODPへの参加や
米国との共同調査以外にシベリアのメタンハ
イドレートに関する調査をロシア、米国と共
同で行っていることが挙げられる。ただし現
時点では、地質調査所の組織としては対応し

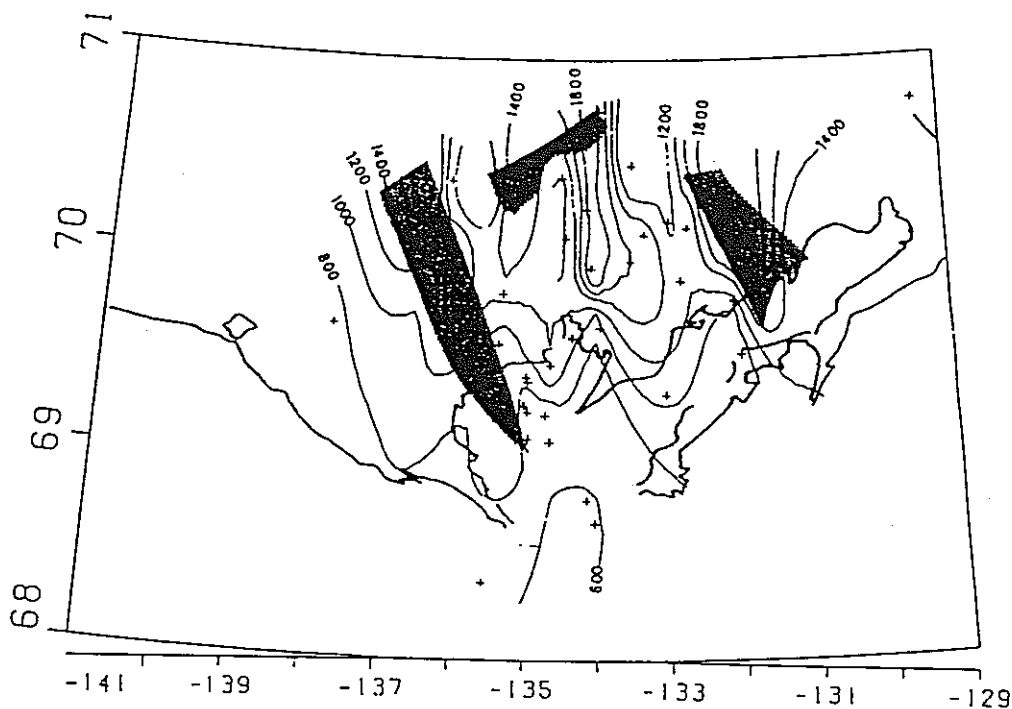


図4 ポーフォート海におけるハイドレートゾーンの最深度 (Judge et al [1992])
アミ掛けはシミュレーションと400m以上の誤差があった場所

ておらず、研究者・技術者の個人レベルでの参加が主のようである。しかし、今後は、地質調査所の組織として対応するためにプロジェクトに格上げする動きがあるようであった。このような動向は、カナダ地質調査所に限らず、米国地質調査所のメロンパークやウッズホールでも感じられた。米国では、メタンハイドレートの研究を将来の資源としての評価に結び付けていく必要性を感じている旨の発言が見られたし、今後ハイドレートに目的をしばった専用の掘削についての期待が述べられていた。

3.2 カルガリー大学における研究

カルガリー大学は、石油の町カルガリーの郊外にキャンパスがあり、2万人の学生を有している。今回、訪問したP. Raj Bishnoi教授の属する学部では、バイオ、重質油、プロセス、貯留層シミュレーション等の研究が行われており、15人の教授と55人の学生が所属している。Bishnoi教授は、ガスハイドレートの基礎的な研究に関する世界的権威で、数多くの研究成果を発表している。

カナダでは、第一次オイルショック以降、国内、国外の多くの会社が北極海で石油・ガスの開発をめざした掘削をしようと、カナダ政府へ許可を求めてきた。カナダ政府としては、ガスハイドレートからのガス放散による環境への影響、災害等が予測されたため、新たに許認可のガイドラインを策定する必要に迫られた。このため、政府は教授らに研究を委託し、これがBishnoi教授にとってガスハイドレート研究の発端となった。現在までカナダの企業・団体のみならず、オランダ・シェル、ノルウェーのスタト・オイル、米国のガ

ス研究所（GRI）等から多くの研究が委託されている。

このような経緯から、Bishnoi教授らの研究では、ガスハイドレートの化学熱力学から出発して、結晶核形成・成長、ガスの溶解を考慮したハイドレート生成機構、分解機構の解明、さらには速度論的解析等がメインテーマとなっており、貴重な研究が多い。さらに、これらの研究は、電解質（塩化ナトリウム、塩化カリウム等）や、アルコール、界面活性剤等を添加した系でも行なわれ、ハイドレートの生成・分解に与える影響を調べ、現場に適用できるような解析が行なわれている。

彼らは、先ず深海におけるガスハイドレートの生成挙動を解析するため、高圧条件のもとで模擬海水中にメタン、エタン等からなる天然ガス成分をバブリングさせて、疑似的に深海条件をつくり、膨大な時間をかけて、様々な成分のガスハイドレートの生成・分解の熱力学データを収集した。

これらのデータをもとに、ガスハイドレートの分解・生成機構の解析モデルを構築した。これは、ガスハイドレートの生成は結晶核形成・成長という結晶化理論とガスの溶解に関する二重境膜説を基にしたモデルで、一つのパラメーターを変更するだけで実験結果とよく一致することが実証された。混合ガス系においても、個々の成分についてはその純ガス系の生成機構と変わらないと仮定すると現象をよく説明することができるという。一方、ガスハイドレートの分解速度は、温度、圧力以外にハイドレート粒子の表面積に依存するようである。

さらに、メタノール、電解質、表面活性剤等の水溶液におけるハイドレート生成反応に

については、最近はガスハイドレートの熱力学的研究を中心に行なっており、メタノールや電解質を含む系の平衡データを集めている。

これらに加え、Bishnoi教授たちのグループは多成分系プロセスシミュレーターを開発しており、彼等の提案している熱力学モデルを

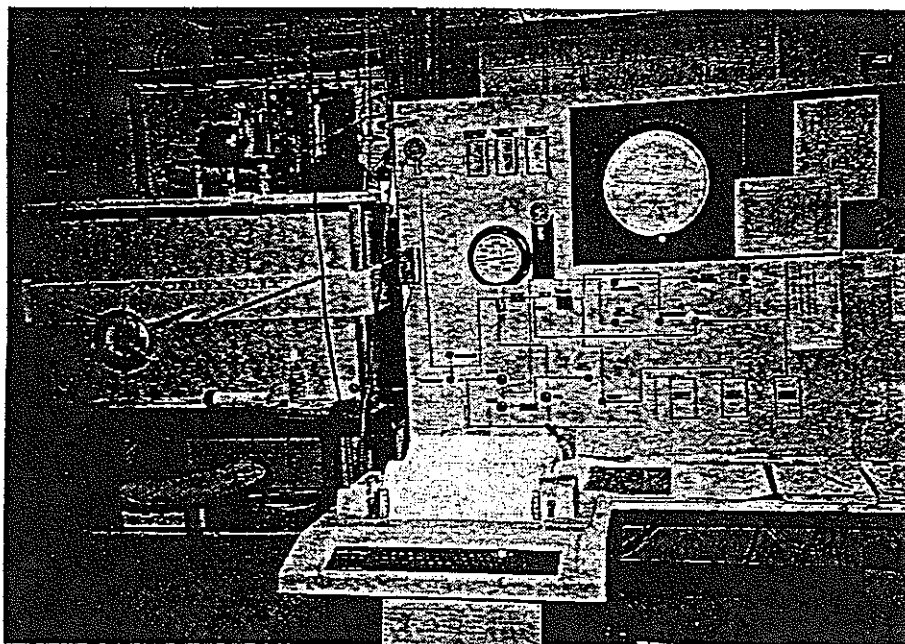


写真2 メタンハイドレート生成実験装置 (カルガリー大学)

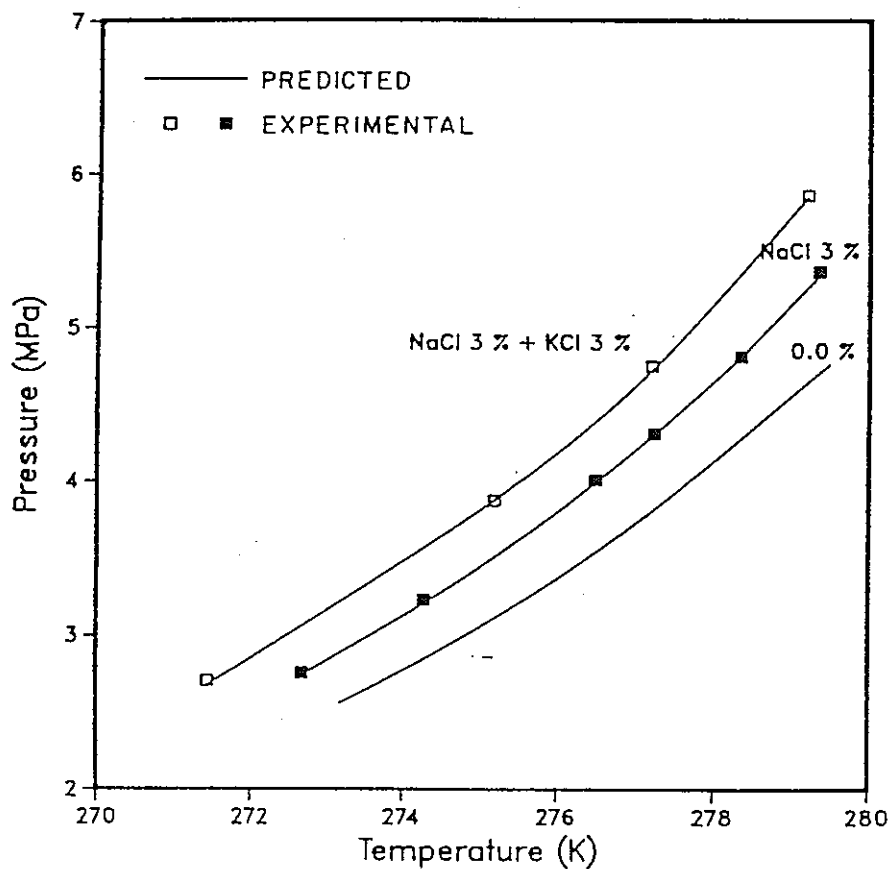


図5 メタン - 電解質水溶液系のメタンハイドレート生成圧力 (Bishnoi [1992])

用いられ、気液が共存する多成分系におけるガスハイドレート生成プロセスのシミュレーションが可能である。

企業からの委託研究の例として、寒冷地の海底天然ガスパイプラインにおけるハイドレート生成・閉塞トラブルに関する研究がある。これは、天然ガス成分、窒素、二酸化炭素混合ガス系で実験したもので、ハイドレート生成に対して水分量が大きく影響することがわかった。

以上のような彼らの研究は、実際にハイドレートの掘削やプラントオペレーションを行なう際に有用な情報をもたらしてくれる貴重なものといえ、今後の研究にも期待したい。

3.3 エネルギー庁の考え方

カナダのエネルギー庁 (National Energy Board) は、1959年11月2日に設立された連邦政府機関で、その役割は石油、天然ガス、電力等の事業活動の許認可行政により公共の利益を守ること、エネルギー資源の開発やエネルギーの使用について政府に提言したり、政府のエネルギー政策を実行することにある。1991年の組織改正により、NWT (North

West Territories) を含む北方フロンティア地域 (カナダ東岸海域を除く) の石油、天然ガス探鉱・開発の鉱区管理行政が追加された。

ここでは、カナダ北西フロンティア地区におけるエネルギー資源の探査・開発、特にハイドレートの探査・開発に対する考え方を聴取したが、それらを要約すると以下のようになる。

カナダのエネルギー資源に対する考え方として、石炭、オイルサンド等、既に実用化されているエネルギーや実用化がもっと近いエネルギーが豊富にあるため、ガスハイドレートへの取り組みの優先順位は低いといえることができる。また、ガスハイドレートそのものに対する関心の順序についても、(1)災害等、(2)資源、(3)環境であり、現時点では必ずしも資源としてのみとらえているわけではない。

エネルギーと環境の問題に関していえば、ガスハイドレートが分解して気候に影響を与える可能性があると考えられている人がいるが、本当にどの程度なのかはまだ定説がなく、例えばロシアでは影響を与えているかどうか議論が分かれているくらいである。したがって、地球温暖化防止のためには、IEAもいって

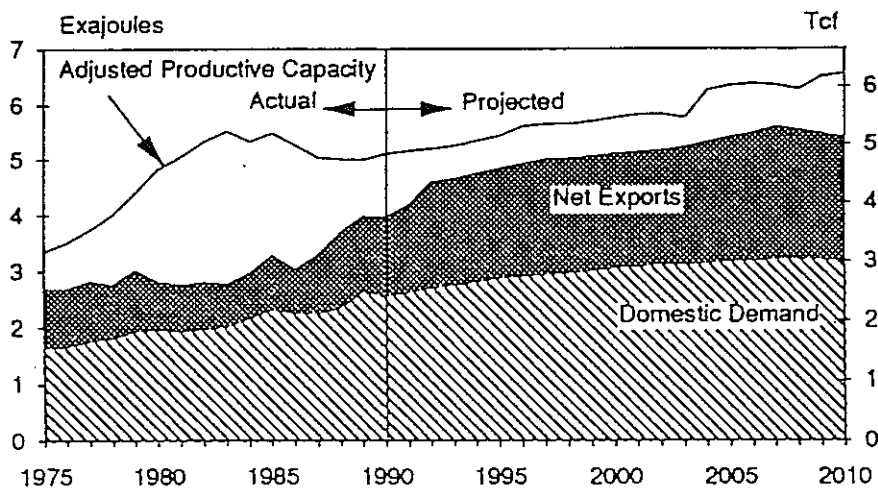


図6 カナダにおける天然ガスの需要供給

いるように、各種エネルギーの使用効率をアップさせることが何より最優先されるべきであり、天然ガスへシフトするのはその次であろう。従って、今すぐにガスハイドレートに関する研究費等を増やして行く計画はない。

以上がカナダエネルギー庁のエネルギー資源に対する基本的な考え方であった。ここには、エネルギー資源に恵まれたカナダという国の現在の状況がよく反映されているといえる。

3.4 石油産業の状況

カナダエネルギー庁における会合に同席したEXXONやAMOCO等の石油会社数社から得た話によれば、彼らとしてもガスハイドレートに対する関心は一応持っており、前述したように早くからボーフォート-マッケンジ地域等で掘削を行っている。しかし、経済性の面からみて、今のところ油価格が高くない限り、ハイドレートからのガスの生産には魅力がないと考えている。

彼らが現在、ガスハイドレートの存在に関心をもっているのは、エネルギー資源としてではなく、むしろ石油掘削時のリグの安全性の確保のためである。これは、掘削中にハイドレート層に突きあたり、ガスハイドレートの急激な分解を誘発して暴噴するのを避けるためである。また、たとえ極地のハイドレートを資源として開発するにしても、凍土の融解による環境への影響や掘削用泥水の処理等について事前に十分検討しておく必要があるし、海域の深部にあるハイドレートに至っては、他のエネルギー資源が豊富にある現在の状況では、資源としてみる段階ではないとい

うことであった。

このような視点は、これまで述べてきたように単に石油産業に限られたものではなく、カナダエネルギー庁と同様のものである。

4. おわりに

米国やカナダ等の在来型のエネルギー資源に恵まれた国々は、メタンハイドレートを資源として今すぐどうこうする考えはなく、主に地質学的時間スケールでみた時の環境に与える影響、例えば地球温暖化に対する影響等の面からとらえているように見える。また、実験室的な規模でガスハイドレートの基礎的な研究が行われたり、地質調査の一環として掘削が行われたりするにしても、メタンハイドレートだけを目的とした掘削が大々的に行なわれることはあまりなさそうである。このような状況下で研究者達の中には国際的な共同研究を望む声が高かったように感じられた。

一方、日本周辺海域にはガスハイドレートの賦存が確認されているが、これを資源として開発するには、今後さらに十分な探査を進めるとともに、優れた生産技術の開発が必要となるが、近い将来、これについては他国にあまり期待できない以上、日本が独自に努力する必要があると思われる。

謝 辞

本文をまとめるにあたり、調査団の石井吉徳団長をはじめ、メンバーの奥田義久、岩下篤、近藤健比古、松本清一、井上淳各氏に多大なお世話になりました。紙面を借りて篤く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) K.A.Kvenvolden, Gas hydrates Geological perspective and global change, *Reviews of Geophysics*, 31,2/MAY, 173 (1993)
- (2) K.A.Kvenvolden, et al, Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates, *Geo-Marine Letters*,13,32(1993)
- (3) A.S.Judge et al, Geothermal conditions for gas hydrates stability in the Beaufort-Mackenzie area : the global change aspect, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 98,251 (1992)
- (4) P.R.Bishnoi et al, Formation and decomposition of gas hydrates of natural gas components, *Journal of Inclusion Phenomena and Molecular Recognition in Chemistry*, 3,89 (1990)

クラスレート水和物

金井 重三郎

1. はじめに

本誌の1991年12月号に筆者が発表した「水の科学」(4)では、気体水和物の解説を半ページ程度述べた。また、本誌の92年6月号に筆者が発表した「空気の科学」(4)では、不活性ガス水和物の解説を4分の1ページ程度述べた。これらの解説は、指摘されるまでもなく、きわめて不十分であった。

今回、「水の科学」(補遺1)として、「クラスレート (Clathrate) 水和物」の解説を取り上げた理由は、次のとおりである。

21世紀の有望な天然ガス資源として、メタン・ハイドレート、コールベッド・メタン、深層天然ガスなど、非在来型天然ガスが注目されるようになってきた。特に、メタン・ハイドレートは、エネルギー資源に乏しい日本の南海トラフ海域 (駿河湾～紀伊半島～四国沖にかけての海域で、その広がりには約3万5000 km²に及ぶ)、十勝・日高沖および網走沖に存在する可能性が高いとされている。エネルギーの大需要地の近くに天然ガス資源が存在するという点で、政府機関、大学をはじめ、民間企業でもメタン・ハイドレートについての検討や研究が盛んにな

ってきた。なお、世界の海域の資源量については、93年現在の天然ガスの確認埋蔵量のおよそ1.6～12倍と推算されている。

2. クラスレート水和物¹⁾

種々の無極性および極性物質をゲスト分子として、水分子をホストとする結晶性のクラスレート水和物は、多くの化合物について単離されており、X線回折などによりその分子構造も明らかにされている。ここでクラスレートという語は、閉じこめられたという意味のギリシャ語で、クラスレート化合物というのは、ホスト側の分子が結合してできた三次元構造の内部に適当な大きさの空孔があって、その中にゲスト分子が入り込んで特定の結晶構造をつくっている物質のことである。ゲスト分子の大きさや形状は、ホスト構造により規定される。第1表には、クラスレート水和物をつくる分子の大きさの順に配列してある。これらの水和物の結晶構造は、50年代にVon Stackelbergらによって研究された。その結果、これらの水和物はすべてかご型のクラスレートであって、2種類の結晶格子が存在している。I型は、結晶の単位細胞の大きさが12.03 Å, II型は17.31 Åである。I型の格子は46個の水分子を含み、II型は136個の水分子を含んでいる。前者は平均半径3.91 Åの2個の小さ

なかごと、平均半径4.33Åの6個の大きなかごからできており(第1図のa,b),後者は平均3.90Åの16個の小さなかごと、平均半径4.68Åの8個の大きなかごからできている(第1図のa,c)。このかごは、水素結合でつながれた水分子によって組み立てられており、ゲスト分子は、穴の中で自由に動き回っている。図に示すように、ゲスト分子が入る空孔は、I型ではそれぞれ12面(a)と14面(b)の面をもち、II型ではそれぞれ12面(a)と16面(c)の面をもっている。これらの面は正五角形、または正六角形である。

各種のアミン分子もかごの水和物をつくるが、上述のクラスレート水合物と違う点は、ゲスト

分子のN原子がホストの水分子に水素結合で結ばれていることである。その意味でセミ・クラスレート(またはIII型クラスレート)といわれている。第2図に、トリメチルアミン水合物 $((CH_3)_3N \cdot 10 \frac{1}{4} H_2O)$ のセミ・クラスレート構造を示した。ゲスト分子は2種類の不規則なかごの中に閉じ込められている。第2図の(a)は2重の14面体のかごであり、(b)は理想的な15面体から著しく変形したかごである。

3. メタン・ハイドレート

第1表 簡単なクラスレート水合物をつくる分子(大きさい順に配列)

6.5	CBr ₂ F ₂	II型	
	(CH ₃) ₃ CH, (CH ₃) ₃ CF, C ₂ H ₅ Br, Propylene Oxide, Cyclobutanone		
	CH ₃ CH=CH ₂ , CHCl ₃ , CCl ₃ F		
	C ₃ H ₈ , Cyclopentene, C ₂ F ₄ , CH ₂ =CHCl, CH ₃ CHCl ₂ , Furan, Acetone		
	C ₂ H ₅ Cl, CCl ₂ F ₂ , CH ₃ CF ₂ Cl, CBrClF ₂		
	Cyclopentane, CH ₂ Cl ₂ , CHCl ₂ F, (CH ₃) ₂ O, Dihydrofuran		
6.0	Tetrahydrofuran		主として I型
	SF ₆ , CBrF ₃		
	CH ₃ I, CHBrF ₂		
	1, 3-Dioxolane		
5.5	COS, C ₂ H ₂ , CH ₂ =CHF, CH ₃ CHF ₂ , CH ₃ SH, (CH ₂) ₃ O		
	BrCl, C ₂ H ₄ , (CH ₂) ₃ , C ₂ H ₅ F, CHClF ₂		
	ClO ₂ , C ₂ H ₆ , CH ₃ Br		
	Cl ₂ , SbH ₃ , CH ₂ ClF, (CH ₂) ₂ O		
	CHF ₃ , CF ₄ , CH ₃ Cl		
5.0	N ₂ O, SO ₂		
	AsH ₃ , CH ₂ F ₂	I型	
	CO ₂		
4.5	CH ₃ F		
	Xe, H ₂ Se, PH ₃		
	N ₂ , H ₂ S, CH ₄		
4.0	Kr, O ₂		
	Ar		

(出所) Davidson, 1973

3-1 メタン・ハイドレートとは⁽²⁾

メタン・ハイドレートは、前述したI型構造である(第3図)。水合数(ガス分子1個に対する水分子数)は、5.75と計算されている。従って、メタン・ハイドレートの理論化学式は、CH₄・5.75 H₂Oである。これから計算されるメタン・ハイドレート中のメタンガス含有量は、水1kgに対してメタンガス9.66モルである。これは、1ℓの水に216ℓのメタンガスが取り込まれていることを意味する。実際は、空隙(くうげき)がすべてガス分子で満たされるようなことはまれで、充足率は70~80%程度のことが多いので、含有されるガス量は、水1ℓ当たり150ℓ程度になる。

一方、II型構造では、水合数は17で、ガス含有量は水1ℓに対して73

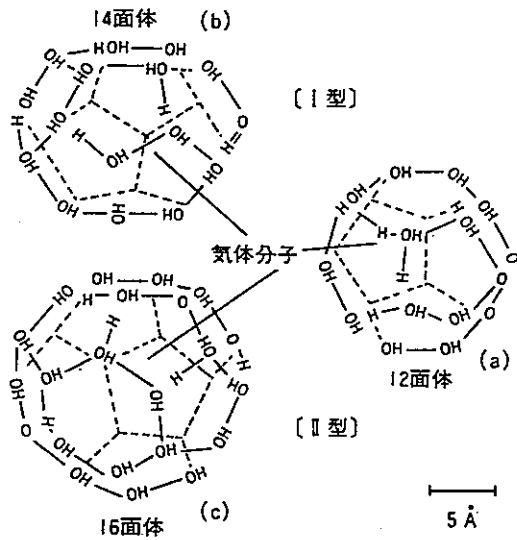
ℓである。空隙充足率を70%とすると、ガスと水の容量比は51:1となる。

第2表は、0°Cでガス・ハイドレートを作るために必要な最小の圧力を示している。例えば、酸素ハイドレートを作るには120気圧の酸素ガスが必要であるが、メタン・ハイドレートは26気圧のメタンでよいことになる。

第4図は、ガスハイドレートの相図を示す。メタン〜水ハイドレートと示した実線がメタン・ハイドレートの生成曲線である。この曲線の左上の領域がメタン・ハイドレートと水が安定に存在する温度と圧力で、右下はフリー・メ

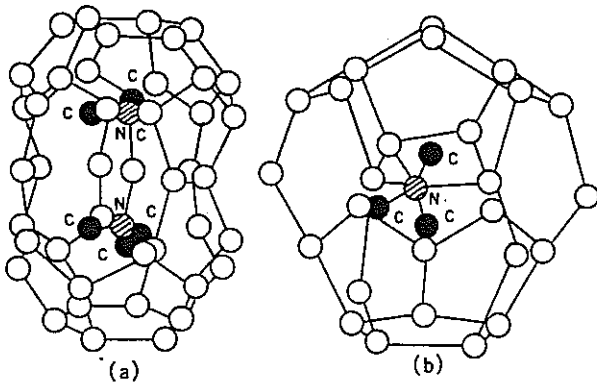
タンと水が共存する領域である。正確にいうと、どちらの水も溶存メタンで飽和されており、過剰なメタンはそれぞれ水和物、フリー・メタン(気泡)として存在している。温度が0°C以下

第1図 気体水和物の構造



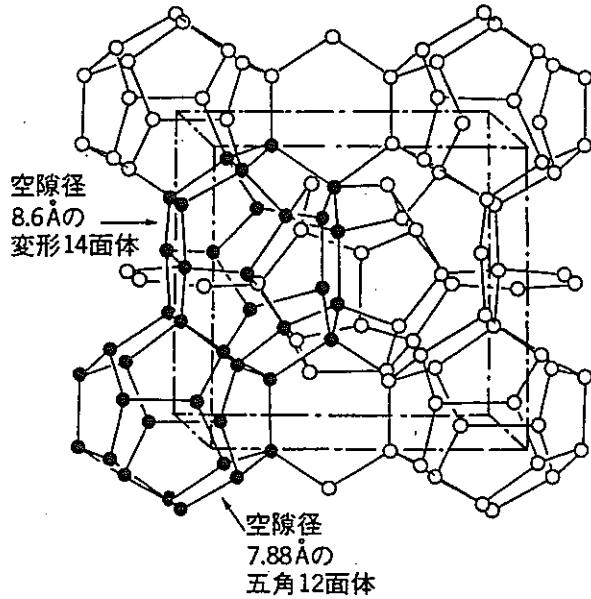
(注) 実線は水素結合を示す
(出所) Davison-Ripmeester, 1978

第2図 トリメチルアミンのセミクラスレート水和物の構造

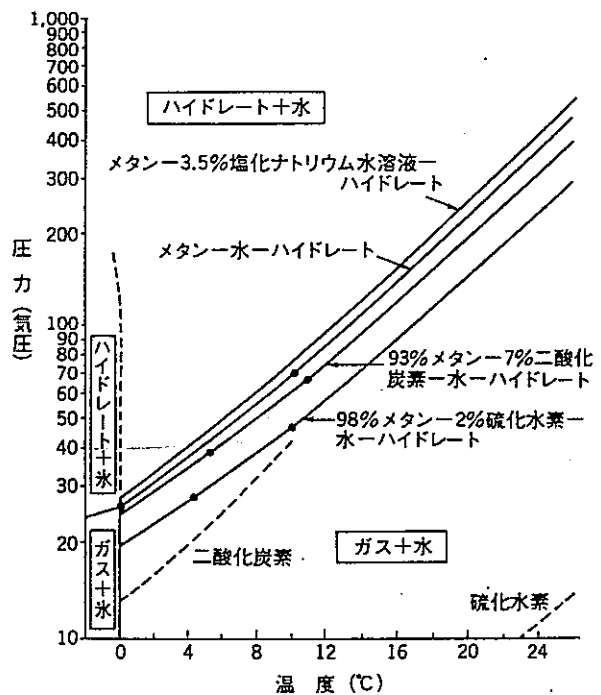


(出所) Davidson, 1973

第3図 メタン・ハイドレートの包接格子



第4図 メタン・ハイドレートの生成条件



二酸化炭素ハイドレート、硫化水素ハイドレートの生成条件も示した。それぞれ境界線の左上がハイドレートで右下はガスと水の混合物

(出所) Claypool, Kaplan, 1974

で氷が存在する状態でもメタン・ハイドレートは生成する。この場合、生成曲線の高压側ではメタン・ハイドレートと氷が共存し、低压側ではフリー・メタンと氷が共存している。二酸化炭素、硫化水素と示された破線は、それぞれ二酸化炭素ハイドレート、硫化水素ハイドレートの生成曲線である。第2表に示したように、どちらもメタン・ハイドレートより、かなり高温・低压側に変化している。これは、メタン・ハイドレートより生成しやすいことを意味している。

筆者は、硫化水素水和物に関して苦い経験をしたことがある。昭和電工の研究所に在籍していた55年ころ、硫化水素～水系二重温度交換法 ($\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{S} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} \cdot \text{H}_2\text{S}$, 気液相, 無触媒反応) による、水よりの重水濃縮研究を政府助成金に基づいて行っていた。当時の重水関連文献および一般の文献には、硫化水素ハイドレート (上述の反応条件は、10～20気圧) のことは全く記載されていなかった (2節に述べた水和物研究の歴史からも明らかである)。しかも、基礎

研究は夏場であったために、なんの障害もなく研究は進行した。しかし、基礎研究をスケール・アップした中間規模研究が冬場であったために、全く予知しない大きな障害が起こったのである。水～硫化水素系を循環しているポンプが“ガリガリ”と音を立て始めたのである。硫化水素ハイドレートの発生である。急ぎ、全水系配管を保温工事して研究を進めたが、そのために研究予算が大幅に増えてしまった。上役から大目玉を食ったことを、今でも忘れることができない。

第4図では、メタンガスに二酸化炭素を7%混合したガス、硫化水素を2%混合したガスからハイドレートができる生成曲線も示してある。生成条件が緩いガス (高温, 低压) を混合すると、混合比に応じて生成曲線は右下へ移動する。

3-2 メタン・ハイドレートの生成²⁾

前述したように、構造Iのメタン・ハイドレートの場合、それ自体の約200倍の体積のメタンガスを固定する。一方、その時共存する水に溶存するメタンガスの量は、水の体積の2～5倍程度である。つまり、ガス・ハイドレート化することによって、溶存できる最大限のメタン量の40～100倍のメタンを含有するようになる。

自然環境でメタン・ハイドレートが生成するためには、(1)十分なガスと水が存在すること、(2)温度、圧力が生成条件を満足すること、(3)生成するための空間があることの3条件が必要である。湖底、海底、堆積 (たいせき) 物中には十分な水があり、陸域では地下水面より下の地層の粒子間隙は水で満たされている。凍土にも十分な氷と水がある。従って、これらの場所で、十分なメタンガス、温度、圧力、空間の条件が満たされればメタン・ハイドレートは生成するので、それらの場所はメタン・ハイドレートの膨大な貯留層となっている。

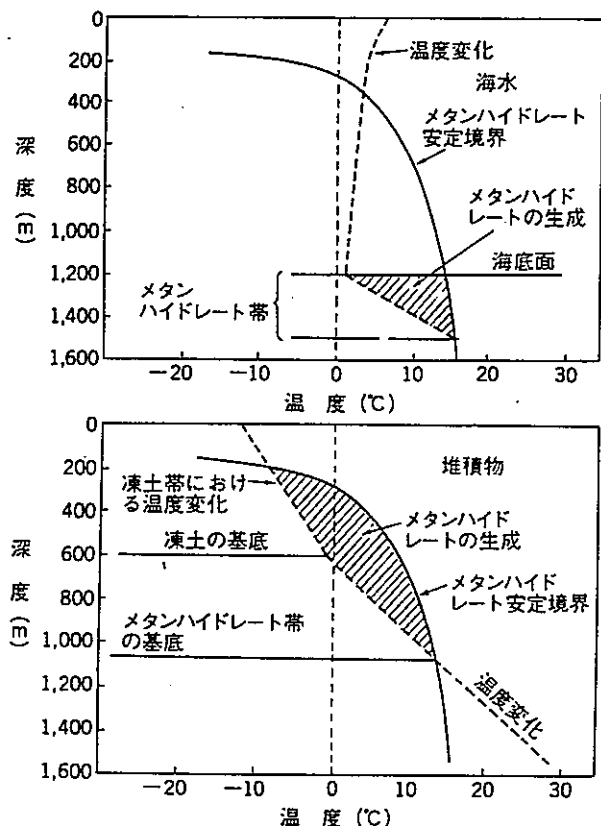
第5図の上は、水深1200mの海水～堆積物で、どこにメタン・ハイドレートができるかを示したものである。太い実線の左側が安定領域である。水深350mの海水中でメタン・ハイドレート安定領域に入り、海底からの深度300m (海面から1500m) の堆積物中で安定領域から抜け

第2表 ガスハイドレートの0°Cにおける分解-凍結圧力

ガ ス	0°Cにおける 分解-凍結 圧力(気圧)	ハイドレート の構造
N ₂	160	I
O ₂	120	I
Ar	95.5	I
Kr	14.5	I
Xe	1.50	I
CF ₄	41.5	I
CH ₄	26.0	I
C ₂ H ₆	5.2	I
CH ₂ -CH ₂ -CH ₂	0.70	I (不安定)
CO ₂	12.5	I
H ₂ S	0.92	I
Cl ₂	0.32	I
C ₃ H ₈	1.74	II
CH ₂ -CH ₂ -CH ₂	0.62	II
CHCl ₃	0.065	II
C ₂ H ₅ Cl	0.26	II
CBrClF ₂	0.19	II

る。つまり、温度と圧力的には、海面から350～

第5図 深海堆積物中(上)および永久凍土(下)でのメタン・ハイドレートの発達



(出所) Collet, 1992

第3表 代表なメタン・ハイドレートの資源量試算値

(単位：天然ガス換算, m³)

	陸 域	海 域	全 域
トロフィミックほか(1977)	5.7×10^{13}	$(5 \sim 25) \times 10^{15}$	
マクイーバー(1981)	3.1×10^{13}	3.1×10^{15}	
メイヤー(1981)	1.4×10^{13}		
ドブリーニンほか(1981)	3.4×10^{16}	7.6×10^{18}	
クベンボルデン(1988)			2.01×10^{16}
クベンボルデンとクレイプ ール(1988)		2.91×10^{16}	
クラソン(1992)		$(2.21 \sim 16.5) \times 10^{16}$	
地質調査所/エネ総工研 (1992)		$(2.5 \sim 5) \times 10^{14}$	

(注) フリーガス量を除く

1500mがメタン・ハイドレートが生成される環境である。

第5図の(下)は、地表温度 -12°C の永久凍土域におけるメタン・ハイドレートの生成域を示したものである。この例ではハイドレート帯の厚さは450mである。

3-3 メタン・ハイドレートの資源量²⁾

一般の炭化水素鉱床とは異なり、メタン・ハイドレート鉱床の場合、資源量試算に必要な要素のなかには未解明なものが多いために、現段階ではメタン・ハイドレートについて精度の高い資源量評価をする手法はない。しかし、すでに発見されて開発・生産されているシベリアのメソヤハ・ガス田などにおける生産データなどを参考にして、多くの研究者らが、世界のメタン・ハイドレート資源量に関して、海域および陸域に分けた試算を行っている。第3表に示したように、天然ガスとして、陸域では数十兆m³、海域で数千兆m³のオーダーの資源量の試算値が得られている。

アメリカのKrasonは、南海トラフの資源量について、ハイドレート層の厚さを1mとした場合には4200億m³、10mとした場合は4兆2000億m³と算出している(第4表)。

一方、わが国の地質調査所やエネルギー総合工学研究所は、日本周辺海域のハイドレート資源量については6兆m³、フリーガス資源量は2兆7000億m³と試算している。

このうちの60%は南海トラフの陸側斜面の資源量である。また、アメリカ・エネルギー省は、南海トラフの資源量について、平均のハイドレート層の厚さを30mと推定して、3兆3000億m³としている。

3-4 メタン・ハイドレートの利用

人類の生産が活発となり、経済が成長するに従ってますます、多量のエネルギーが必要となってきた。その結果、天然ガス、石炭、石油などの再生不能のエネルギー資源は、これまでにない勢いで消費されている。その成長率は、88/2000年比でそれぞれ11%、17.4%、51.6%である（長期エネルギー需給見通し〈1990年6月〉）。一方、いわゆる新エネルギー（太陽エネルギー、アルコール燃料など）、水力、地熱などはほとんど期待できないのが現状である。また、わが国の通産省などが推進しているNew Sun Shine計画による国内エネルギー需給・CO₂制約緩和への貢献シナリオも前途多難とされている。

西山³⁾による石油、石炭、天然ガス、ウランの静態的耐用年数を第5表に示した。静態的耐用年数とは、埋蔵量を消費量で割ったもので、消費の伸び率を考慮した指数関数的耐用年数、さらには今後新しい鉱床が次々と発見される（採鉱技術の進歩も含む）ことを想定して、70年の埋蔵量を5倍に増加した場合の指数関数的耐用年数と区別しなければならない。天然ガスについては、Meadows (The Limits to Growth, 1972) によると、それぞれ38年、22年（予想成長率4.7%）、49年としている。

天然ガスについては、生産量の多い国はロシア、アメリカの2カ国で、埋蔵量の多い国はロシアが40%と多く、次にイラン、サウジアラビアの14%、4%で、後述するように、メタン・

ハイドレートとは異なり、偏在した資源である。また、石油と同様に生産量の多い国と埋蔵量の多い国が一致しておらず、今後の需給動向に変動が予想される。しかし、天然ガスの輸送手段は特殊化しており、パイプラインと液化天然ガス・タンカーに限られているために、開発に当たっては多大な投資と長い年月を必要とし、あらかじめ消費者と生産者を設定して行う必要がある。このようなことから、天然ガスは原油のような国際商品にはなりにくい。

第4表 地域別メタン・ハイドレートの資源量試算値

海 域	ハイドレート の厚さ1m	ハイドレート の厚さ10m
	m ³	m ³
ラブラドル海	0.71×10 ¹²	7.1×10 ¹²
ボルチモアキャニオン	1.08×10 ¹²	10.8×10 ¹²
ブレークアウターリッジ	1.88×10 ¹²	18.8×10 ¹²
メキシコ湾	2.57×10 ¹²	25.7×10 ¹²
コロンビア海盆	3.42×10 ¹²	34.2×10 ¹²
パナマ海盆	0.85×10 ¹²	8.5×10 ¹²
中米海溝	2.62×10 ¹²	13.4×10 ¹²
北カリフォルニア	0.14×10 ¹²	1.4×10 ¹²
アリューシャン海溝	0.28×10 ¹²	2.8×10 ¹²
ボーフォート海	6.85×10 ¹²	20.7×10 ¹²
南海トラフ	0.42×10 ¹²	4.2×10 ¹²
黒海	0.08×10 ¹²	0.8×10 ¹²
合計	21.0×10 ¹²	149.0×10 ¹²

(出所) Krason, 1992

第5表 化石燃料の静的耐用年数(R/P)

(単位：1,000トン)

	生産量(P)	埋蔵量(R)	耐用年数	主な産出国
石油	2,930,687	132,795,534	45	ロシア(17%), サウジ(14%), アメリカ(12%)
石炭	3,474,000	515,795,000	148	中国(30%), アメリカ(23%), ロシア(15%)
天然ガス	1,928,770	101,763,240	53	ロシア(38%), アメリカ(24%), カナダ(6%)
ウラン	50	2,200	44	ロシア(28%), カナダ(18%), オーストラリア(7%)

(注) 石油は1bbl=0.134トン、天然ガスは39.2×10³ft³=1トンとして計算。生産量は88~90年、埋蔵量は90年のもの

このような背景にあって、メタン・ハイドレートへの関心が高まっている理由は、メタン・ハイドレートが次のような特性をもっているからである²⁾。(1)埋蔵量が膨大である。永久凍土域と海底堆積物に含まれるハイドレートを合わせると、控え目な見積もりでも2000兆 m³程度とされている。(2)表層近くに分布している。ハイドレートは地表、海底から数百mより浅い堆積物中に含まれている。これは、従来の石油、天然ガス鉱床の賦存深度より浅く、技術的に十分開発できる深度である。(3)クリーンである。同じ熱エネルギーを得るために必要なメタンの量は石油、石炭より少なく、熱エネルギー当たりのCO₂放出量は、それぞれの68~53%と見積もられている。従って、漏出メタンの効果を考慮しても、全体としての温室効果(地球温暖化~地球生態系の破壊)は、石油を使用するときの約3分の2になるとされている。(4)分布域が偏在していない。永久凍土域と有機物の多い大陸棚~斜面堆積物中に広く分布している。従って、ほとんど世界中に広がっている。例えば、日本周辺では、オホーツク海(網走沖)、奥尻海嶺(日本海)、千島海溝周辺(十勝・日高沖)、西津軽海盆(日本海)、南海トラフ(四国~東海沖)がある。このような特徴をもつハイドレートが石油代替エネルギー資源として、または現在知られている天然ガス資源に追加され

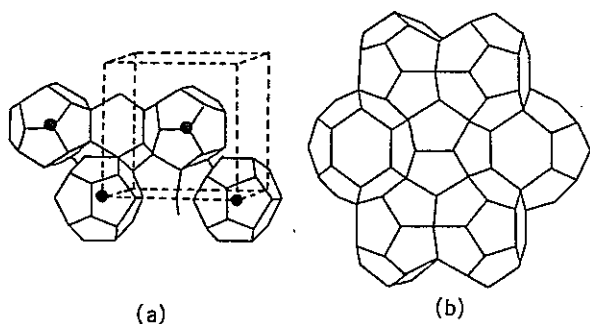
て利用できるようになれば、資源と環境が直面する危機を大きく軽減することができるはずである。

メタン・ハイドレート層に由来するガスだけを対象として開発や生産が行われたガス田は、現在のところ世界中にない。しかし、シベリア、アラスカ、カナダなどの極地方の陸域および北極海沿岸域の一部では、メタン・ハイドレート層の実質的な探査や、メタン・ハイドレート層の下位に存在する通常の石油・天然ガス鉱床と合わせたメタン・ハイドレート層の開発・生産が試みられている。

4. 不活性気体ハイドレート⁴⁾

不活性気体は、ヒドロキノン、フェノールおよび他のいくつかの化合物とクラスレートをつくるが、もっとも簡単なものはAr, Kr, Xeのハイドレートである。He, Neのハイドレートはまだ知られていない。これらのハイドレートは、前述のように水5.75分子当たりのゲスト原子(単原子分子)の最大数は1個である。第6図にキセノン・ハイドレートの結晶模型を示した。ハイドレートの安定性のある部は、枠組みの中に閉じ込められた分子と水分子の間のvan der waalsの力によるものであり、また、ある部分は水素結合によるものである。満たされていない枠組みの安定性は、氷のそれと同等であると予想されそうであるが、ハイドレートは普通の氷よりも幾分すき間が多いので、van der waals相互作用による安定化の増大量は氷のそれよりも約0.7KJ/molだけ少ない。第6表に273Kにおける解離圧と1気圧の下での結晶の

第6図 キセノン・ハイドレートの結晶



(a)キセノン・ハイドレート結晶の一部:キセノン原子(●)のいくつかをその中にもっている構造。単位立方体あたり46個の水分子が存在し、このうち20個ずつの2組が5角12面体のかごにある。残りの6個が12面体の結合を保っている。(b)キセノン・ハイドレート結晶の別の眺め。おのおの12面体(中心)は14面体にとり囲まれている。6個の14面体と2個の12面体とで単位立方体を形成している

第6表 不活性ガスハイドレート(5.75H₂O)の物性

	1気圧での分解温度(K)	0°Cでの解離圧(X10atm)	生成熱(KJ/mol)
Ar	230.4	10.6	—
Kr	245.4	1.47	58.1
Xe	269.8	0.15	69.9

分解温度を示した。示された数値は第2表の数値とは若干異なっている。

5. ガスハイドレートの応用

(1) 淡水化

海水、またはかん水（塩分を含む地下水）を淡水化するいくつかの方法⁵⁾のなかに、かつてアメリカのテキサスで日産100トンの試験工場が運転されたことのあるガス・ハイドレート法がある。

プロパンを用いて、減圧下で1.7°Cで海水と混合すると、プロパンは海水中の水と結合して、塩分を全く含まないクラスレート化合物を形成する。この結晶は、前述したように（プロパン）：（水）=1：17で、結晶として海水から分離して洗浄できる。7.2°C、プロパンの圧力4.76気圧というのが飲料水をつくる適当な条件である⁶⁾。結晶をつくった後、わずかに昇温すれば、飲料水が分離してくる。プロパンガスは循環して再度利用する。海水を冷却する熱源はLNG（液化天然ガス、-162°C）が考えられているが、この方法の適用地域がLNG基地周辺（例えば、東京ガスの根岸工場では、3800万トンのLNGを輸入して、都市ガスを供給するとともに、冷熱利用工業として、冷熱発電〈4000kW出力〉、液体酸素やドライ・アイスの製造、冷凍食品〈2万食〉、

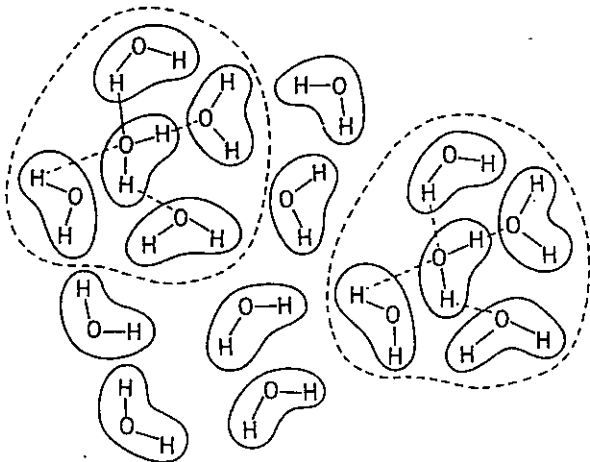
冷凍庫〈2万トン〉、火力発電用の海水の冷却などが実用化している⁷⁾）に限られることが欠点である。もう1つの欠点は、淡水化に要するエネルギーが、淡水化の主流である逆浸透法などに比べて、2倍程度大きいことである。しかし、LNGの冷熱を有効に利用できるという点で、再考の余地はあると考えられる。

(2) ガス貯留²⁾

3-1節と3-2節で述べたように、メタン・ハイドレートは、溶存できる最大限のメタン量の40~100倍のメタンを含有することができる。メタンを液化すれば、貯蔵効率はよくなり、狭い場所に大量のガスを貯留できるが、メタンを液化するには、温度を-83°C（臨界温度）以下、圧力を45.6気圧（臨界圧力）以上にしなければならない。メタン・ハイドレートは、これよりずっとゆるやかな条件でつくることができるので、メタンガス貯留方法として有望である。メタンガスをガスハイドレート化して運搬する方法も検討されている。

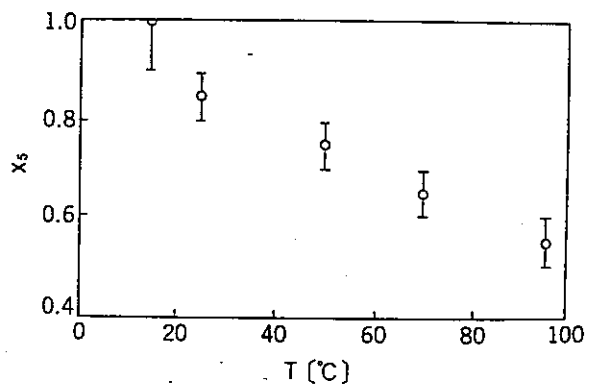
東京ガスの横井らはガス・ハイドレートの生成促進に関する研究を行った。彼らが試した添加物はアミン、エーテル、ケトン、アセトンなどであるが、いずれの試薬も低圧、高温側へのシフトがはっきり現れた。例えばアセトンの場合、（水）：（アセトン）のモル比を15~20としたとき、1°Cにおけるメタン・ハイドレートの生成圧力は約30気圧から10気圧へと大きく低下した。また、30気圧における生成温度は、1°Cから10°Cへと上昇した。これらの研究結果は、ハイドレートによるガス貯留を容易にするもので

第7図 水の構造モデル例



○----- : クラスタ部分 - - - - : 水素結合

第8図 水温と5員体の比率 x_5 の関係



ある。

6. 広義のクラスレート (イオンの水和構造)

「水の科学」(2)⁹⁾で解説したように、氷の結晶ではすべての水分子は水素結合で結ばれ、四面体構造をとって配位数は4である。一方、液体の水では水素結合がゆがめられていて、そのすき間に水分子が入るために、配位数は4.4と測定されている。液体の水でも氷Ihに似た酸列がかなり保存されていると考えられる。このようなことから、荒川⁹⁾は第7図に示すような水の構造モデルを考えた。モノマーの水分子と5員体(配位数4)の混合物が液体の水であり、第8図に示すように、温度上昇に伴って5員体の割合が減少し、モノマーの割合が増加している。一方、Némethyは、氷Ihと類似の密度

の低い氷様構造と高密度の水素結合していない分子の集合の2状態を考え、この2種類の状態がある割合で混合しているとした。水素結合した集団をClusterと呼んだ。ちなみに、水をNMR(核磁気共鳴)で測定すると、水分子集団の大きさに応じた信号がでる。数値が小さいほど、分子集団は小さい。各地の水道水、井戸水、さらに長寿村(アルメニア共和国)の飲み水などを採取してNMRで調べた結果を第7表に示した。これらの結果から、数値が小さい水ほど「おいしく、健康によい」と結論された(日本電子の松下)。余談であるが、広島県呉市にあるみそ会社では、みそに振動を与えて(活性水)、clusterを壊しながら醸造して、おいしいみそをつくらせている(NHK, 95年3月8日)。「おいしい水」とclusterの大小については、「水の科学」(補遺2)で解説する。

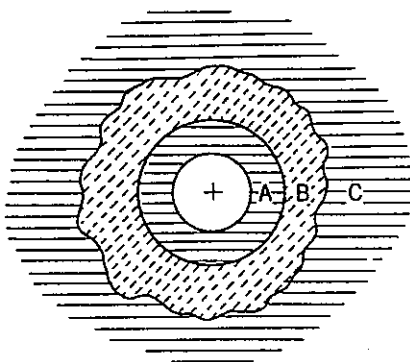
水の偽氷構造が温度や圧力だけでなく、その中にイオンが存在すると、イオンの周囲の電場の影響を受けることは当然、想像される。

イオンの水和について模式的に説明するものとして、Frank~Wen(1957)モデルを第9図に示した¹⁰⁾。半径の比較的小さいイオン(例えばLi⁺、多価イオン)が水中にあるとき、そのイオン近傍の水分子の状態は、イオンによる電場の作用による影響の現れ方により、図に示した3つの領域に分かれる。最近接域Aは、電場によって水分子の電気双極子が強く配向され、いわばイオンにある程度固定化された領域である。その外側のB領域は、電場による配向作用はA領域ほど強くはないが、そこに存在する水分子が、自らの最隣接分子とつくる四面体配位に一定の影響が現れる程度には強く、その結果として、水の液体構造の「構造破壊効果」が現れる領域である。その外側のC領域は、電場は十分に弱く、構造的に通常の水の状態を保っている。このモデルでは、B領域はすべてのイオンにおいて存在するが、A領域が出現するかどうかは、イオンの価数と大きさによるとみるのである。例えば、K⁺以上の大きさの1価のカチオンの場合には、常温でA領域は存在せず、イオンの周囲は直接B領域になる。すなわち、この場合が負水

第7表 各地の水の分析結果(平均値)

サンプル	NMR数値 (ヘルツ)
雨 水	119
天然湧(ゆ)水	122
ミネラル水	94
井戸水	105
水道水	117
蒸留水	118
長寿村の水	80

第9図 イオン近傍の水の構造



- A: 水分の固定された領域
- B: 水の構造が破壊された領域
- C: 正常な構造をもつ領域

和である。Li⁺, Na⁺, 多価イオンではA領域が出現し、それが全体を強く支配して正水和となると考えられている。いずれにしても、イオンの水和構造は広義のクラスレートと考えてもよさそうである。

参考資料

- 1) 鈴木啓三：水および水溶液p. 204～, 共立出版(1980)
- 2) 松本良, 外2人：メタンハイドレートp. 39～, 日経サイエンス社(1994)
- 3) 西山孝：資源経済学のすすめp. 46, 中公新書1154 (1993)

- 4) B. L. Smith, 奥田訳：不活性気体p. 140, 共立出版(1981)
- 5) 今井寅二郎：化学経済p. 102, (1992年1月号)
- 6) Anon：Chem. Eng. News 39(1), 37(1961)
- 7) 東京新聞：1993年6月11日
- 8) 今井寅二郎：化学経済p. 26(1991年10月号)
- 9) 久保昌治：新しい水の基礎知識p. 17, オーム社(1993)
- 10) 荒川泓：4°Cの謎p. 167, 北大図書刊行会(1991)



メタンハイドレート研究の最前線

天然ガス生産・二酸化炭素海底隔離の基礎研究

— 気体包接化合物の構造・物性の解明 —

大垣 一成

おおがき かずなり

松原 拓也

まつばら たくや

中野 真也

なかの しんや

編集部

受理：1996年7月12日

筆者：大阪大学基礎工学部 助教授

大阪大学基礎工学部

大阪大学基礎工学部

深海底地中に存在する天然ガス包接化合物に二酸化炭素を接触させ、置換反応を利用して、天然ガスを生産しながら、同時にその地点に二酸化炭素を気体包接化合物として長期隔離する複合プロセスを提案し、その基礎研究として純粋・混合気体包接化合物の構造・機能・平衡関係などを明らかにすることが本研究の目的である。

1. はじめに

気体包接化合物を利用した地球温暖化問題・エネルギー資源問題の対策技術をさきに提案したが、それらの基礎情報として重要な気体包接化合物の構造・反応特性・熱力学物性を明らかにし、提案したプロセスの妥当性・実現可能性等について検討することが本研究の目的である。特に深海底地中に存在する天然ガス包接化合物から天然ガスを生産しながらその地点に二酸化炭素を貯蔵隔離するプロセス（大垣ら，1994）は地球温暖化問題とエネルギー資源問題をリンクさせる複合技術であり、その技術開発に必要な混合気体包接化合物の高圧相平衡関係・二酸化炭素による天然ガスとの置換反応速度・結晶構造変化・籠の安定性と結晶の生成分解機構などに関する研究はほとんど行われていないことから、実験手法の開発を含めあらゆることを手探りで進める必要がある。

2. 気体包接化合物の単結晶と安定性

深海底掘削や地震波を用いた調査により、深海底地中には気体包接化合物として膨大な埋蔵量の天然ガスの存在が確認されるようになった。この包接化合物は低温・高圧で安定な水の水素結合により、内部に気体分子を包接する籠から構成される。ここでは各種の気体包接化合物を人工的に単結晶として成長させ、その安定性に及ぼす温度・圧力の影響について検討した結果を紹介する。なお測定圧力範囲については、さきに提案した二酸化炭素の深海底貯蔵技術（大垣・井上，1991）との関連で水深10000mに相当する約100MPaまでとし、水（流体で飽和）—包接化合物—高圧流体（水で飽和）の三相が共存する温度・圧力条件を測定した。

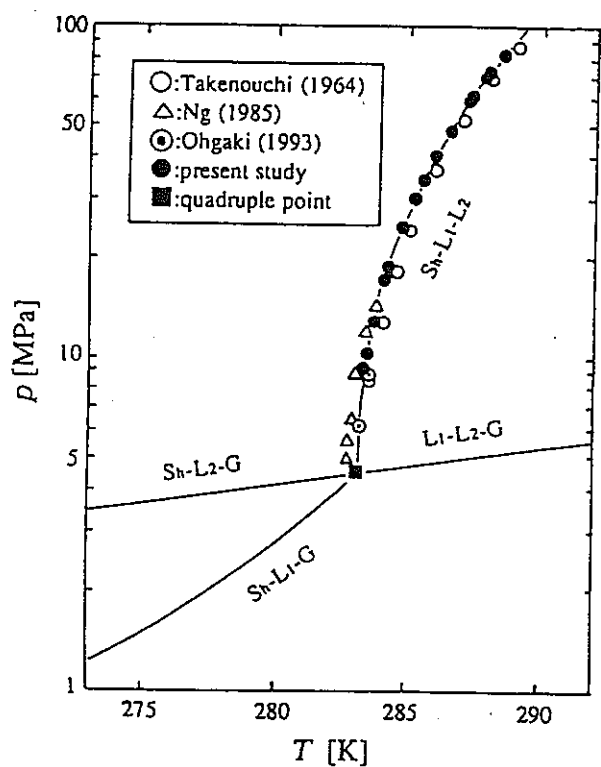


図1 二酸化炭素包接化合物の人工単結晶写真と三相共存曲線。

1) 二酸化炭素包接化合物

液体二酸化炭素を深海底に貯蔵する場合、特にその比重が海水、包接化合物、液体二酸化炭素の順に大きくなれば、包接化合物が海水と二酸化炭素との界面で固体の屋根を形成するため、それが海洋への二酸化炭素の拡散を抑制し二酸化炭素の長期安定貯蔵が可能となる。この密度条件を満足させるのは約60MPaとなることを確認することが

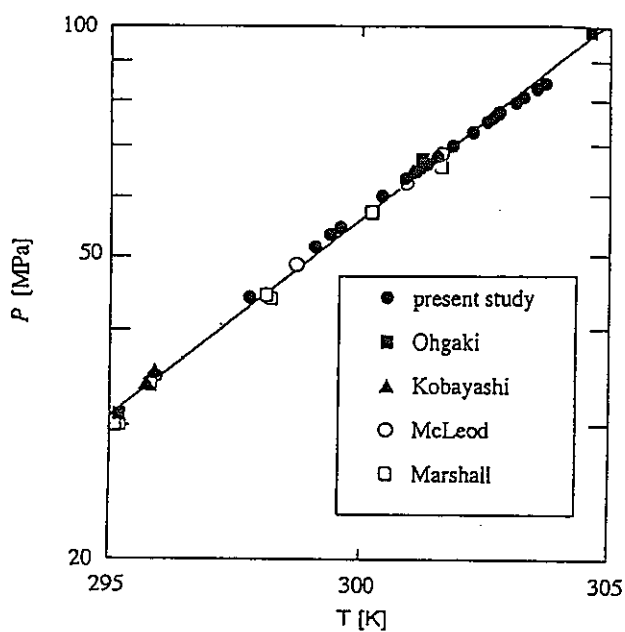


図2 メタン包接化合物の三相共存曲線。

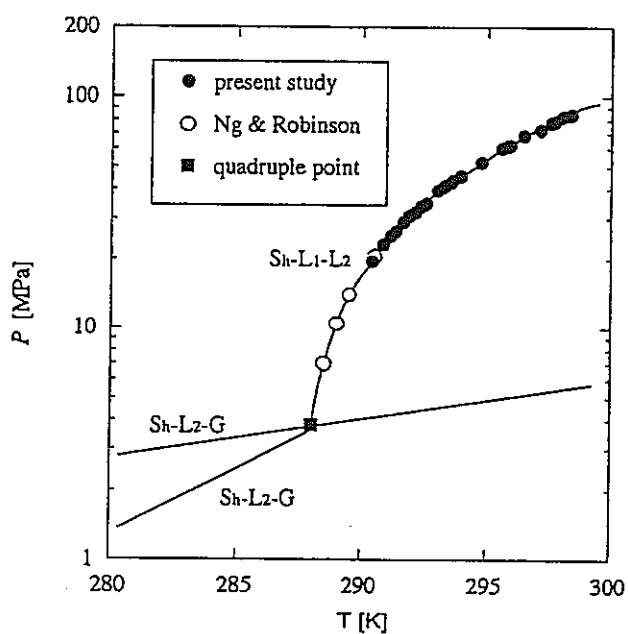


図3 エタン包接化合物の三相共存曲線。

出来た (大垣・濱中, 1995)。数週間かけて高压下で熟成 (半日単位で温度を0.1Kの幅でサイクルさせ続ける) した二酸化炭素包接化合物の単結晶写真と実測した三相共存曲線の結果を図1に示す。結晶は氷と類似の六方晶となり、また結晶表面にはくぼみやその連続体を確認されるがこれら

は気体包接化合物結晶の特徴である。

2) メタン・エタン包接化合物

天然ガスの主成分であるメタンとエタンの包接化合物の三相共存曲線の測定結果をそれぞれ図2, 3に示す。単結晶の熟成方法は二酸化炭素包接化合物の場合とほとんど同じで、保持圧力は約80 MPaである。この条件では三相共存曲線の温度依存性が非常に大きく、温度上昇操作による「過飽和度」の減少は同時に圧力増加による過飽和度の増大を引き起こすため、微妙な飽和度調製が可能である(日経産業新聞, 1996)。メタン包接化合物の三相共存曲線の特徴のひとつは、二酸化炭素やエタンの場合と異なり、氷点近傍温度に存在する四相共存点(水-水-包接化合物-流体)から水-包接化合物-流体の三相共存圧力が約500 MPaまで温度に対して連続単調に増加することである。気液の臨界温度が高い二酸化炭素やエタン(いずれも臨界温度が約304K)包接化合物の場合、氷点温度付近の四相共存点の他にもうひとつの四相共存点(水-包接化合物-気体-液体)が出現する。

3) 各純粋気体包接化合物の熱物性比較

メタン包接化合物と二酸化炭素包接化合物を比較すると、構造的には共に「構造I」の結晶格子を持つこと、生成エンタルピー変化についても二酸化炭素の溶解に伴うエンタルピー変化を考慮すれば共に類似の値(溶解度の差が大きくオーバーオールの変化量の絶対値は二酸化炭素の方が30%程度大きい。Ohgaki *et al.*, 1993)である。そのほか平均水和数についても、「気体包接化合物とは?」というかなり難解な議論を避け、いずれも「構造I」の理想水和数(46/8)に近いと考えた。気体包接化合物中では等モルのメタンと二酸化炭素の置換が比較的スムーズに進行するものと考えられる。

3. 二酸化炭素による気体包接化合物からの天然ガス採掘プロセスの提案

海底地中に存在する天然ガス包接化合物は非在来型エネルギー資源としてよりも、むしろ災害防

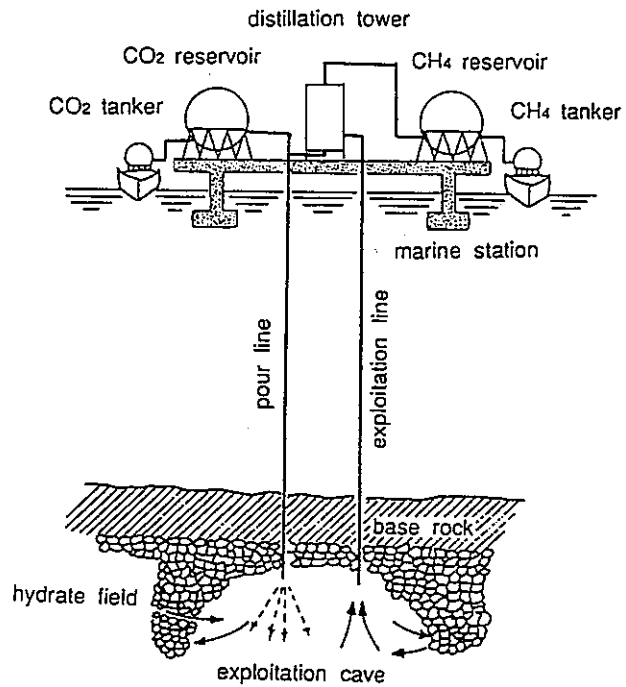


図4 天然ガス生産と二酸化炭素貯蔵を同時進行させるプロセスの概念図。

止・危険物処理対象として考える傾向があった。バミューダ海域の連続遭難事故や大陸棚での大規模地滑りなどの原因として天然ガス包接化合物の分解が注目されているのも事実だが、ミランコビッチ周期での氷期終末における急激な温度上昇の鍵を握るのもこの包接化合物の分解ではないかと考えられる。最近の地球温暖化現象に伴い深海底の天然ガス包接化合物の安定領域が減少し、大量の天然ガスが大気中に放出されれば、益々深刻な温暖化問題を引き起こす可能性がある。逆に天然ガス資源としてこの気体包接化合物を積極的に利用しようとする動きが我が国に起こり、比較的クリーンとされる天然ガス利用の傾向が強まってきたことや四国沖深海底中に莫大な埋蔵量が推測されている(Aoki *et al.*, 1983)ことなどの好条件から、益々注目されるようになってきた。

深海底地中の天然ガス包接化合物採掘におけるひとつの問題点は、包接化合物を分解するのに必要な大量の熱を如何に供給するかである。この問題と、地球温暖化気体として問題になっている二

酸化炭素の貯蔵・隔離とを同時に解決する技術（プロセスの概念を図4に示す）の可能性をさらに詳しく検討するのが本研究の目的である。深海底地中で二酸化炭素と天然ガスの混合気体およびそれらの混合気体包接化合物が平衡あるいは定常状態を保持しながら、一定気相組成の天然ガスを採取しつつ二酸化炭素を選択的に包接化合物として貯蔵するためには、純粋メタン包接化合物は不安定で、逆に純粋二酸化炭素包接化合物が安定となり、二酸化炭素組成は混合気体よりも包接化合物中の方が高濃度となる必要がある。このことを確認するためには、混合気体包接化合物の三相共存下での相平衡関係を明らかにする必要があり、さらにそれらの速度論的解明も天然ガス生産速度・二酸化炭素の供給速度など操作条件を検討する上で必要不可欠である。

4. 混合気体包接化合物の相平衡関係

深海底地中を想定した温度280Kにおける等温の高圧相平衡関係の測定では、体積を検定しておいた高圧容器の中に、三相（混合気体-水を主成分とする液体-混合気体包接化合物）が共存するように予め推定しておいた所定量の水・二酸化炭素・メタンをそれぞれのモル数を正確に測定しながら導入する。上下方向の攪拌操作により平衡状態を出現させたのち、温度・圧力を測定し、混合気体の平衡組成を分析する。水中への気体の溶解度は温度・圧力の関数として予め決定しておき、混合気体のモル体積を状態方程式から求めると、物質収支から混合気体包接化合物の生成量と組成が求まる。得られた結果を図5に示す。縦軸は平衡圧力で横軸は二酸化炭素のモル分率（水分子を除いた）で、両端はそれぞれメタンおよび二酸化炭素の純粋気体包接化合物の三相共存点である。様々な組成での混合気体包接化合物の三相共存点について、実測した各相中のモル分率をプロットし、滑らかな曲線で示した。また包接化合物の相挙動を表現するために提案されている吸着モデルでは、「構造I」を構成する二種類の籠について各気体成分の占有率を計算するので、化合物全体の

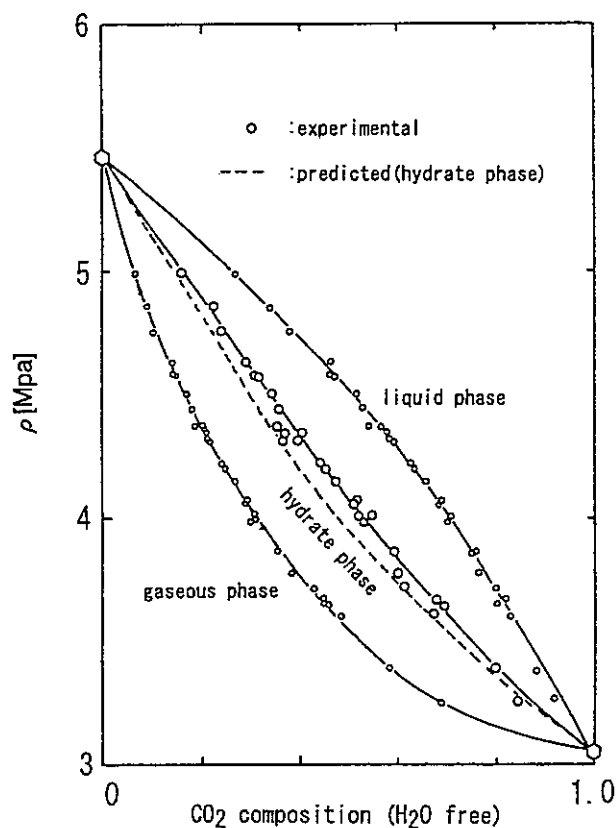


図5 混合気体包接化合物系の高圧相平衡関係。

気体分子組成を推定することが可能である。実測した平衡温度・平衡圧力・平衡気相組成を与えて混合気体包接化合物中の二酸化炭素を推算した結果を破線で示した。推算結果は、実測値との隔りがあるものの、全体的な挙動を一応表現しているものと考えられる (Ohgaki *et al.*, 1996)。

混合気相中のメタン組成は混合包接化合物に比べかなり大きく、平衡分配比は全体平均で約2.5となり、二酸化炭素が選択的に包接化合物中に取り込まれ、逆にメタンの気相中濃度が高くなることを意味する。このことにより、我々が提案した複合プロセスが原理的（平衡論的）に可能であることを初めて実証することが出来たことになる。

5. 気体包接化合物の反応速度

平衡論的な性質に加え気体包接化合物の反応特性を明らかにすることは、天然ガスの生産速度や二酸化炭素の供給速度など、より実際的な操作条

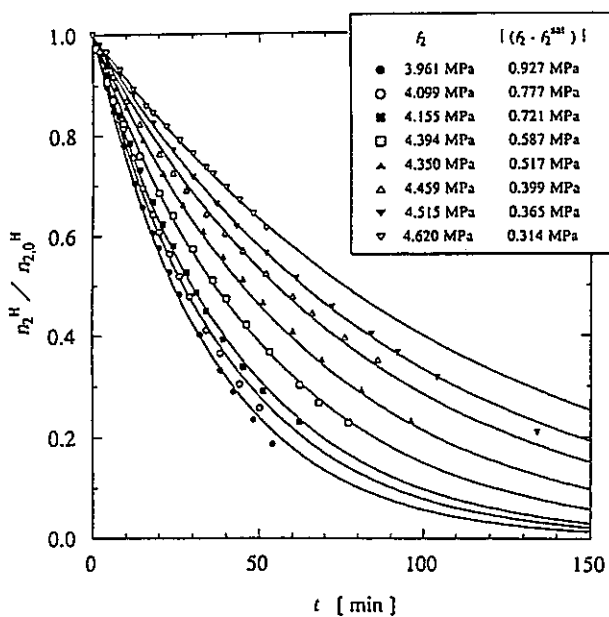


図6 メタン包接化合物の分解速度。

件を検討するうえできわめて重要である。与えられた温度・圧力のもとで三相を共存させたまま、各純粋気体成分を供給あるいは排出しながら圧力を一定に保持し続け、供給・排出速度はそれぞれ重量変化と気体流量計により測定した。いずれの場合も十分な内部攪拌が必要で、ここでもさきに述べた上下攪拌方式を採用した。

各純粋気体の包接化合物の見かけの反応速度が包接化合物のモル数に比例し、三相共存状態のフガシティーからのずれに対して一次反応モデルが適用できるとして測定結果を解析した。メタン包接化合物の分解速度の結果の一例を図6に示す。図中の実線は反応モデルによる計算値である。メタンおよび二酸化炭素包接化合物いずれの場合も分解反応の速度定数の方が生成反応の速度定数より大きな値となる。また生成と分解反応速度定数とも二酸化炭素の方がメタンに比べて大きな値となった。しかし、気液界面の物質移動抵抗が大きな鍵を握る生成反応についてはさらに詳しい検討を要するものと考えられる。

最も興味深い結果のひとつは、混合気体包接化合物系の三相共存状態での分解速度を測定したところ、各純粋気体包接化合物の分解速度に比べ、

メタン包接化合物の分解が速くなり、逆に二酸化炭素包接化合物の分解は遅くなる。つまり、平衡物性から得られたのと同じように包接化合物中では速度論的にもメタンの方が選択的に脱離していることが判明した。

6. 今後の課題

本研究で提案した複合プロセスの基礎研究として、実験室レベルで取り組むことが出来る課題がいくつか取り残されている。

- 1) 水溶液中での籠の生成、結晶化開始および結晶成長機構の解明、平均水和数の決定
- 2) 混合気体包接化合物の結晶構造変化の解明
- 3) 籠レベルでの混合かあるいはゾーン単位での混在かの確認
- 4) 包接化合物結晶内部での気体分子の拡散機構の解明

さらに、深海底地中の天然ガス包接化合物の存在形態・海底環境等に関する調査研究はもちろんのこと、最も困難な課題と思われる人類の存続とそれに伴うエネルギー消費・生産活動と地球環境との連関について世界的コンセンサスを創造することなど、「マルチスケール」空間での取り組みが必要である。

本研究は文部省施設整備費による「気体包接化合物機能測定システム (GHAS)」の科学的援助を受けた。また関西電力(株)および(財)レーザー技術総合研究所の経済的援助を受けた。

参考文献

- [1] Aoki, Y., Tamano, T. and Kato, S. : Am. Assoc. Pet. Geol., 34, 309-322 (1983).
- [2] 大垣一成, 井上義朗 : 化学工学論文集, 17, 1053-1055 (1991). trans. in Int. Chem. Eng., 34, 417-419 (1994).
- [3] Ohgaki, K., Makihara, Y. and Takano, K. : J. Chem. Eng. Japan, 26, 558-564 (1993).
- [4] 大垣一成, 高野清光, 守時正人 : 化学工学論文集, 20, 121-123 (1994).
- [5] 大垣一成, 濱中貴大 : 化学工学論文集, 21, 800-803 (1995).
- [6] 日経産業新聞 : 平成8年2月5日朝刊.
- [7] Ohgaki, K. et al. : J. Chem. Eng. Japan, 29, 478-483 (1996).



メタンハイドレート研究の最前線

メタンハイドレート合成 実験と安定条件の検討

前川 竜 男

まえかわ たつお

今井 登

いまい のぼる

編集部

受理：1996年7月29日

筆者：地質調査所地殻化学部 課長

地質調査所地殻化学部 課長

天然に産出するメタンハイドレートがどのような環境で安定に存在しているのか評価するために、室内合成実験により塩水中のメタンハイドレートの安定な温度・圧力条件などの物理化学的性質の検討を行った。

1. はじめに

メタンハイドレートという聞きなれない物質が注目を集めるようになったのは、化石燃料資源の枯渇問題がさかんに取り上げられていた頃、非在来型天然ガス鉱床の開発について議論されるようになってからである。非在来型天然ガス鉱床というのは、在来型の天然ガス鉱床に対しその成因や貯留形態の異なる新しいタイプの天然ガス鉱床のことで、メタンハイドレートと、そのほかに地下深部に大量の初成的メタンが存在すると考えられてきた深層天然ガス、および石炭とともに産出するコールベッドメタンの主に3種類の非在来型天然ガスについて考察されてきた。その中でもメタンハイドレートは、地球表層付近に大量の天然ガスを貯蔵していると考えられていることから、実際に採掘可能な有望な非在来型天然ガス鉱床として現在注目を集めている。

メタンハイドレートは白い氷のような固体物質で、メタンと水の化合物である。しかし氷とは異なり、メタンハイドレートは天然ガスの主成分である可燃性のメタンガスを多量に内包していることから、火を近づけると燃焼しながら分解する。このことから“燃える雪玉”とも呼ばれてきた(図1)。このメタンハイドレートは高緯度地方の寒冷な永久凍土下の堆積物中や大陸縁辺海域の深海堆積物中など、天然の低温・高圧環境の堆積物中に大量に存在していることが近年の調査で明らかにされてきたが、これらの天然に産出するメタンハイドレートを採掘しエネルギー資源として利用しようとする研究が最近さかんに行われている。地質調査所においてもメタンハイドレートの資源的利用を目的とした研究を行っており、天然のメタンハイドレートがどのような環境で存在しているかなど、メタンハイドレートの安定な温

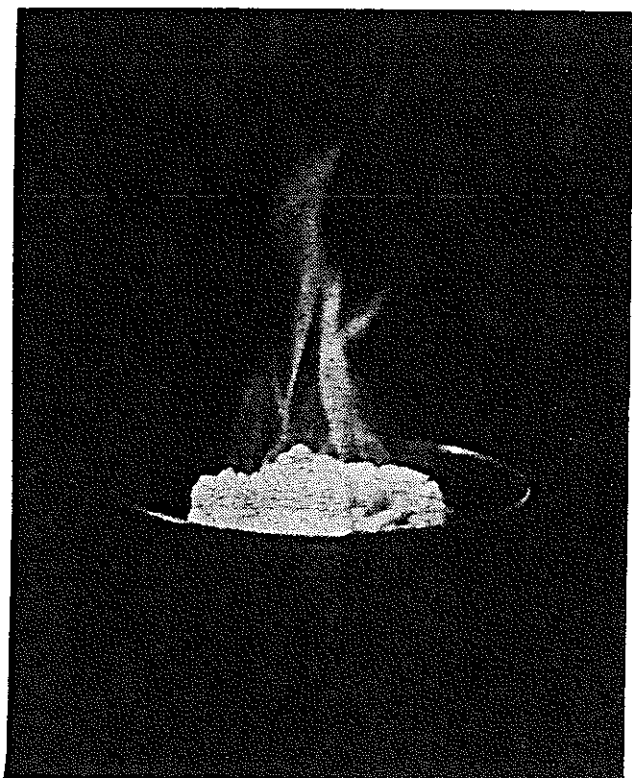


図1 “燃える雪玉” 地質調査所で合成されたメタンハイドレート。

度・圧力条件等の物理化学的性質の解明を中心に研究を行っている。本論では地質調査所において行われた塩水中のメタンハイドレートの安定条件の測定など室内合成実験を用いた最近の研究について紹介する。

2. メタンハイドレートの安定条件を変化させる要因

20世紀初め、シベリアやアラスカ等の寒冷地域の天然ガスパイプラインが閉塞・破損する事故が起こり、その原因がパイプライン中でのメタンハイドレートの生成であることが明らかにされた。そのため天然ガスの輸送を妨害するメタンハイドレートの生成を抑制したり、分解を促進させたりする技術の確立のため、メタンハイドレートの安定条件を求める実験が当時さかに行われた。その後、地球表層で大量のメタンハイドレ-

表1 これまで行われた海水および塩化ナトリウム水溶液中でのメタンハイドレートの合成実験。

	NaCl水溶液濃度	最大実験圧力(MPa)
Kobayashi et al.(1951)	10%, 20%	~ 13.7
de Roo et al. (1983)	11.7%, 20.5%, 21.6%, 24.2%	~ 11.0
Dholabhai et al. (1991)	人工模擬海水(3.5%)	~ 9.1
	3%, 5%, 10%, 15%	~ 7.3
Dickens and Quinby-Hunt (1994)	天然海水(3.35%)	~ 10.0
Maekawa et al. (1995)	3.5%(海水相当), 10%, 20%	~ 18.0

トの存在が推定されるにつれて、どのような環境でメタンハイドレートが存在しているか評価するため実際の天然環境を模した条件でメタンハイドレートの合成実験が行われるようになってきた。これまで行われた実験より、メタンハイドレートの安定条件を変化させる要因として、以下の3つの効果が考えられている。

1) ガス混合の効果：メタンにエタンなど他のガス成分が混合するとメタンハイドレートの安定条件が変化する (Deaton and Frost, 1946)。

2) 水への添加剤の効果 (塩分濃度の効果)：メタンハイドレートを生成させる水に塩類などが溶解するとメタンハイドレートの安定条件が変化する (Kobayashi et al., 1951)。

3) 堆積物の孔隙の効果：堆積物中では水の移動が制限され、水の活動度が減少するため、メタンハイドレートが生成しにくくなり、安定条件は低温・高圧側にシフトする (Handa and Stupin, 1992)。この効果は最近まで知られていなかったためほとんど研究が進んでいないが、海域の深海堆積物中など天然のメタンハイドレートの生成環境で起こりうる効果と考えられている。

3. 海水中のメタンハイドレートの安定条件の検討

1930年代以降のメタンハイドレートの安定条件を求める実験より、メタンハイドレートを生成させる水に塩類などが添加すると、メタンハイドレートの安定条件が変化することが明らかにされた。Kobayashi et al. (1951) は、10%、20%の濃度の

塩化ナトリウム水溶液中でメタンハイドレートを生成し、塩分濃度が増加するにつれてメタンハイドレートの安定条件が低温・高圧側にシフトすることを示した。このことは塩化ナトリウムがメタンハイドレートの生成を阻害していることを示している。また、de Roo *et al.* (1983) はメタンハイドレートを利用し、天然ガスを岩塩ドーム内へ貯蔵する方法を提案し、11%以上の高濃度の塩化ナトリウム水溶液中でのメタンハイドレートの合成実験を行った。彼らは、実験結果から塩化ナトリウム水溶液濃度に対するメタンハイドレートの分解温度・圧力条件を表す以下のような経験式を導き出している。

$$\ln(p/p_0) = 33.1103 - 8160.43/T - 128.65x + 40.28x^2 - 138.49 \ln(1-x)$$

p : 圧力 [MPa], p_0 : 大気圧 [MPa], T : 温度 [K],
 x : 水溶液中の塩化ナトリウムのモル分率

1960年代になって、高緯度地方の永久凍土の下盤堆積物中や海域の深海堆積物中に天然のメタンハイドレートの存在が推定されるようになった。それらが資源や環境・災害などの面から注目されるようになると、実際に天然に産出するメタンハイドレートがどのような環境で生成しているのか評価するため、メタンハイドレートが安定に存在する温度・圧力条件を求める必要が生じてきた。Claypool and Kaplan (1974) はそれまでに行われた高濃度の塩化ナトリウム水溶液中のメタンハイドレートの安定条件の実験結果を用いて海水相当の塩分濃度に対するメタンハイドレートの安定条件を推算して議論しているが、実際の海水環境を考慮した実験は1990年代になるまで行われなかった。Englezos and Bishnoi (1988) は、さまざまな塩類を含む水溶液中のメタンハイドレートの安定条件を統計熱力学的な計算により算出した。Dholabhai *et al.* (1991) は、Englezos and Bishnoi (1988) の計算結果を実験的に検討するため塩水中でメタンハイドレートの合成実験を行った。また、人工的に合成した模擬海水中でメタンハイドレートを合成し、その安定条件を求めた。その後、

Dickens and Quinby-Hunt (1994) は、初めて天然海水(塩分濃度33.5%)を用いてメタンハイドレートの合成実験を行い、以下のような天然海水中におけるメタンハイドレートの安定な温度・圧力条件の経験式を導き出している。

$$1/T = 3.79 \times 10^{-3} - 2.83 \times 10^{-4} (\log p)$$

T : 温度 [K], p : 圧力 [MPa]

彼らは、天然海水中のメタンハイドレートの安定条件を純水中の安定条件と比較して、天然海水中の安定条件は純水中の場合より1.1℃低温側にシフトすることを示した。このように最近になって天然環境を模した条件でメタンハイドレートの合成実験が行われるようになったが、これまでの実験では、10MPa以下の比較的低下の圧力領域でしか塩水中のメタンハイドレートの安定条件が求められていない。10MPaという圧力は、実際の海洋では約1000m程度の水深の堆積物にかかる静水圧に相当する。しかし、日本近海の南海トラフをはじめとする大陸縁辺海域のメタンハイドレートは水深1000m以上のさらに高い圧力領域にも存在していることから、10MPaまでの安定条件の測定だけでは不十分であった。さらに高い圧力領域における塩水中のメタンハイドレートの安定条件を求めるため、地質調査所において海水の塩分濃度に相当する3.5%の塩化ナトリウム水溶液中でメタンハイドレートを合成し、その安定条件を実験的に求めた。同時に、純水中および高濃度(10%, 20%)の塩化ナトリウム水溶液中でもメタンハイドレートの安定条件を求め、塩化ナトリウムがメタンハイドレートの安定条件に与える効果について検討した。

4. メタンハイドレート合成実験装置

メタンハイドレートの合成は、圧力容器中でメタンガスと水溶液を反応させて行った。使用した合成装置は圧力容器とその温度を制御するヒーターや冷却器、および圧力容器中でのメタンハイドレートの生成・分解を確認するための光学的検出器から構成されている。はじめに圧力容器中にメタン

ガスと水溶液を密閉し、冷却器で温度を下げることによってメタンハイドレートを生成させる。圧力容器中で水とメタンが反応してメタンハイドレートができたかどうかを検出するために、水溶液を透過する光を用いた光学的検出器を開発した。この検出器は、圧力容器のガラス窓の一方から光を圧力容器内に導き入れ、対面する光量センサーで水溶液を透過した光の光量の変化を測定することによって、メタンハイドレートの生成・分解を確認することができる。光量変化が起こった時の温度・圧力を記録計から読みとることによって、メタンハイドレートの安定条件を求めることができる。この実験装置の詳細については前川ほか(1995)に記述した。

5. 塩化ナトリウム水溶液中のメタンハイドレートの安定条件

この実験装置を用いて、塩化ナトリウム水溶液中でのメタンハイドレートの合成実験を行い、その安定条件を求めた。使用した塩化ナトリウム水溶液は、ほぼ海水の塩分濃度に近い3.5%の水溶液と、より高濃度の10%、20%の水溶液、さらに塩類を加えていない純水を用いてそれぞれメタンハイドレートを合成し、塩分濃度に対する安定条件の変化を求めた。

図2は合成実験の結果を示しており、それぞれの塩化ナトリウム水溶液濃度に対するメタンハイドレートの安定条件を示している。さらにこれまで求められてきた純水中のメタンハイドレートの安定条件 (Sloan, 1990)、および Kobayashi *et al.* (1951) の実験の結果も示す。それぞれの安定条件より低温・高圧の温度・圧力領域でメタンハイドレートは安定に存在している。この図より、メタンハイドレートの安定条件は、塩化ナトリウム水溶液の濃度が増加するにつれて低温・高圧側にシフトしていることがわかる。つまりメタンハイドレートの安定領域が小さくなりメタンハイドレートが生成しにくくなることを意味している。

合成実験により求められた温度・圧力条件を用いて、新しく塩化ナトリウム水溶液中のメタンハ

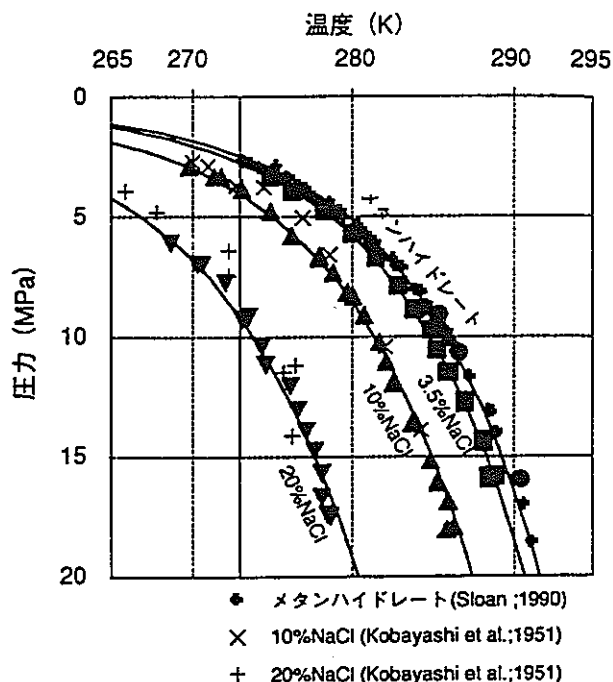


図2 塩化ナトリウム水溶液中のメタンハイドレートの安定条件 (Maekawa *et al.*, 1995). 各濃度における安定条件曲線の低温・高圧側でメタンハイドレートは安定に存在する。塩化ナトリウム水溶液の濃度が増加するにつれて、メタンハイドレートの安定条件は低温・高圧にシフトしている。

イドレートの安定条件の経験式を算出した。この式の算出には、合成実験の結果の他に、Sloan (1990) によってまとめられた純水中でのメタンハイドレートの安定条件の結果も加え、最小二乗法を用いて決定した。その結果、塩化ナトリウム水溶液濃度に対するメタンハイドレートの分解温度・圧力条件の経験式は以下のように導かれた。

$$\ln(p/p_0) = -926.815 + 31979.3/T + 144.909 \ln T + 5847.92x + 3220.26x^2 + 5840.50 \ln(1-x)$$

p : 圧力 [MPa], p_0 : 大気圧 [MPa], T : 温度 [K],
 x : 水溶液中の塩化ナトリウムのモル分率

この実験結果を Kobayashi *et al.* (1951) の実験結果と比較するとほぼ同様の傾向を示すが、彼らの結果はメタンハイドレートの安定条件が今回得られた安定条件と比較して高温・低圧側にずれている。これより、Diamond (1994) も指摘しているように彼らの実験結果はメタンハイドレートの

安定性を過大評価しているのではないかと推察される。また、今回得られたこの経験式と de Roo *et al.* (1983) の実験結果と比較した。彼らが導いた任意の塩化ナトリウム濃度に対するメタンハイドレートの安定条件に合成実験で用いた水溶液濃度を代入し、メタンハイドレートの安定条件の曲線を求めた。その結果、合成実験から得られた結果と比較すると、10MPa以下の比較的低下の圧力領域ではよく一致したが、それ以上の高圧条件では一致しなかった。この原因として、彼らは10MPa程度の比較的低下の圧力条件でしか実験しておらず、その結果から導かれた彼らのメタンハイドレートの安定条件の経験式は、より高い圧力領域には外挿して適用できないことがわかった。このように、これまで与えられてきた安定条件の経験式はより高い圧力領域へは適用できず、このため高い圧力領域におけるメタンハイドレートの合成実験を進めることが必要となってくる。

合成実験より導かれた塩化ナトリウム水溶液中のメタンハイドレートの安定条件の経験式を用いると、海水相当の塩化ナトリウム濃度をもつ3.5%水溶液中のメタンハイドレートの安定条件が純水中に比べてどのくらい低温側へシフトしているか、その差を計算することができる。その結果、18MPaまでの圧力領域では海水相当の水溶液中のメタンハイドレートの分解温度は、純水中よりも約1.1℃低いことがわかった。この結果は、塩類を混合した人工海水を用いてメタンハイドレートを合成した Dholabhai *et al.* (1991) の実験や、天然海水を用いた Dickens and Quinby-Hunt (1994) の実験と同様の結果を示している。

6. まとめ

これまでの実験の結果より、塩分濃度の効果などメタンハイドレートの安定条件に変化を与える効果が明らかになってきた。天然に産出するメタンハイドレートの安定条件はさまざまな効果が互いに影響していると考えられる。地質調査所では、メタンハイドレートの安定条件に影響を与えるそれぞれの効果についてより詳細な研究を行ってお

り、塩化ナトリウム水溶液中のメタンハイドレートの安定条件の検討は地質調査所で行ってきた合成実験によるメタンハイドレートの研究のひとつである。メタンハイドレートの物理化学的性質の解明、特に天然の堆積物中のメタンハイドレートを評価する際に必要なメタンハイドレートの安定条件を変化させる様々な効果についてさらに定量的な検討を進めていく必要がある。

参考文献

- [1] Claypool, G. E. and Kaplan, I. R. : The origin and distribution of methane in marine sediments. in *Natural Gases in Marine Sediments* (I. R. Kaplan ed.), Plenum, New York, 99-139 (1974).
- [2] Deaton, W. M. and Frost, E. M. : Gas hydrates and their relation to the operation of natural gas pipe lines. U. S. Bureau of Mines Monograph, 8 (1946).
- [3] de Roo, J. L., Peters, R. N., Lichtenthaler, R. N. and Diepen, G. A. M. : Occurrence of methane hydrate in saturated and unsaturated solutions of sodium chloride and water in dependence of temperature and pressure. *AIChE J.*, 29, 651-657 (1983).
- [4] Dholabhai, P. D., Englezos, P., Kalogerakis, N. and Bishnoi, P. R. : Equilibrium conditions for methane hydrate formation in aqueous mixed electrolyte solutions. *Can. J. Chem. Eng.*, 69, 800-805 (1991).
- [5] Dickens, G. R. and Quinby-Hunt, M. S. : Methane hydrate stability in seawater. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2115-2118 (1994).
- [6] Englezos, P. and Bishnoi, P. R. : Prediction of gas hydrate formation conditions in aqueous electrolyte solutions. *AIChE J.*, 34, 1718-1721 (1988).
- [7] Handa, Y. P. and Stupin, D. : Thermodynamic properties and dissociation characteristics of methane hydrate and propane hydrate in 70-Å-radius silica gel pores. *J. Phys. Chem.*, 96, 8599-8603 (1992).
- [8] Kobayashi, R., Withrow, H. J., Williams, G. B. and Katz, D. L. : Gas hydrate formation with brine and ethanol solutions. *Proc. 30th Ann. Convention Natural Gasoline Assoc. Amer.*, 27-31 (1951).
- [9] Maekawa, T., Itoh, S., Sakata, S., Igari, S. and Imai, N. : Pressure and Temperature conditions for methane hydrate dissociation in sodium chloride solutions. *Geochem. J.*, 29, 325-329 (1995).
- [10] 前川竜男・猪狩俊一郎・坂田 将・伊藤司郎・今井登 : メタンハイドレートの合成と分解条件の測定. *地質調査所月報*, 46, 425-432 (1995).
- [11] Sloan, E. D., Jr. : *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Marcel Dekker Inc., New York, pp.641 (1990).



メタンハイドレート研究の最前線

添加剤による，メタンのハイドレート化の促進と阻害

奥井 智治

おくい としはる

川崎 達治

かわさき たつじ

前田 有理子

まえだ ゆりこ

近藤 健比古

こんどう たけひこ

編集部

受理：1996年8月3日

筆者：

東京ガス株式会社フロンティアテクノロジー研究所
東京ガス株式会社フロンティアテクノロジー研究所
東京ガス株式会社フロンティアテクノロジー研究所
東京ガス株式会社フロンティアテクノロジー研究所 副所長

固体中に大量のガスを含有し得るというハイドレートの特徴を，資源やガス貯蔵法として実際に活用するために，水相への添加剤によるハイドレート生成分解特性の制御について研究を行っている。

1. はじめに

近年，メタンハイドレートは次世代の天然ガス資源として，また新規ガス貯蔵法として注目を集めている。その特徴は，ハイドレートが単位体積当たり，標準状態気体に換算して約200倍という大量のガスを含有し得る（松本ら，1994）という点である。

この特徴を工業的に利用するには，ハイドレートの生成分解特性を平衡論的な側面と速度論的な側面の両面から把握し，制御する必要がある。このためには，純粋なメタンハイドレートについての物性測定にとどまらず，それらを変化させる要因の探索が必要である。

筆者らは，特にメタン貯蔵法としてのハイドレート利用への関心から，メタンを含むハイドレートをより安定に生成させることを目的として，水相に各種の添加剤を共存させた場合についてハイドレートの生成分解平衡線測定を行い，添加剤の効果を検討してきた（横井ら，1993）。その後，ハイドレート生成分解速度についても，水相への添加剤の影響を検討している（Saito *et al.*, 1996）。

本報告では，これら水相への添加剤の，メタン加圧によるハイドレート生成分解挙動への平衡論的，および速度論的影響について述べる。近頃，資源としての天然ガスハイドレートへの関心が高まるにつれ，これら生成分解挙動に関する知見が，今後は天然ガスハイドレートの掘削やガス開発における生成分解制御の場面でも役立つと考えられる。

2. 添加剤共存下のハイドレート

添加剤によるハイドレートの生成分解制御のうち，ハイドレートの生成防止に関しては，特にガス輸送用のパイプライン中でのハイドレート生成に

よる閉塞事故を防ぐ必要性から多くの研究がなされてきている (Kobayashi *et al.*, 1951; Hammerschmidt, 1939; Deaton and Frost, 1946; Bond and Russel, 1949). 逆に, メタンをハイドレート中に貯蔵するためには, ハイドレートの生成を促進する添加剤が必要であるといえることができる。

メタンハイドレートに関して添加剤を含む系を考えると, 添加剤がハイドレートの構造に及ぼす影響により, 大きく二つに分けて考える必要がある。一つは, 添加剤がハイドレートに取り込まれず, 生成するハイドレートは純粋なメタンハイドレートと同じものである場合であり, もう一つは, 添加剤がハイドレート中に取り込まれ, 異なる構造のハイドレートが生成する場合である。

添加剤がハイドレートに取り込まれない場合の例としては, パイプライン中でのハイドレート生成防止効果が報告されている, 塩類やメタノールなどがあげられる (Kobayashi *et al.*, 1951; Hammerschmidt, 1939; Deaton and Frost, 1946; Bond and Russel, 1949). これらの添加剤は, 水分子と独自の水和構造やクラスター構造をとり (野口, 1978; Yamamoto *et al.*, 1996), ハイドレート構造へ移行する際により多くのエネルギーが必要となるためにハイドレート生成が阻害されると考えられる。このような場合には, 生成分解平衡線が変化しても生成したハイドレートは純粋なメタンハイドレートと同じI型 (McMullan and Jeffrey, 1965) であるので, 添加剤の効果としては「メタンハイドレートの生成阻害」と表現される。

添加剤 (もしくは共存する少量成分) がハイドレート中に取り込まれ, 異なる構造のハイドレートを構成する例としては, メタンにプロパンが含まれる場合や, 水相中にある種の水溶性有機物が共存する場合に, メタンが主成分であってもその構造がII型 (Mak and McMullan, 1965) になり生成分解平衡線が高温低圧側にシフトするという報告 (Thakore *et al.*, 1987; Ripmeester *et al.*, 1980) があげられ, これらは基本的に同じ現象である。このような場合には, ハイドレートの生成分解平衡線が変化すると同時に, 構造や添加剤の含有率な

ども異なるハイドレートが生成している。厳密な意味では「メタンハイドレート」とは, 水とメタンのみから構成されたI型構造のハイドレートをさすので, これらの効果に対して「添加剤による, メタンハイドレートの生成促進」という表現は厳密には誤りであり, 「添加剤による, メタンのハイドレート化の促進」という程度の表現が妥当であると考えられる (ただし, 天然ガスハイドレートを資源として扱う分野においてはメタンを主成分とする天然ガスハイドレートを総称してメタンハイドレートと呼ぶ場合も多い)。

本報告では, このように主成分はメタンであるが添加剤により構造が異なると考えられるハイドレートについて, 生成分解平衡線と生成速度の測定結果を示し, 添加剤の効果について考察した。

3. 実験

1) 装置

装置は既報のもの (横井ら, 1993) を用いた。容積500ml, 耐圧5MPaのステンレス (SUS316) 製の生成容器に, 最大回転数1000rpmの回転式攪拌機を備えている。系内の温度は, 容器を恒温槽内に設置して冷却することにより制御した。気相, 液相, 恒温槽の各温度, 気相圧力, 攪拌回転数が自動的に計測され, これらの経時変化が記録できる。

2) 方法

i) 生成分解平衡線への影響の測定

添加剤の候補として, 当初はメタン貯蔵法としてのハイドレート利用を目的としたため, 気相への放散が少ないことが望ましいと考え, 水溶性の有機化合物から選定した。各種の水溶性有機化合物について, 一定モル濃度になるよう水相中に添加し, 温度が安定した後に激しく攪拌しながらメタンで加圧してハイドレートを生成させたのち, その温度における分解平衡を既報の方法 (横井ら, 1993) により測定した。異なる温度について同様の分解平衡圧の測定を繰り返し, 生成分解平衡線を求めた。

ii) 生成速度への影響の測定

生成速度の測定は、ハイドレート生成に伴うメタンの圧力低下速度の測定により行った。水相に一定濃度の各種添加剤を共存させてメタンで加圧した場合について、一定温度においてハイドレート生成に伴う気相圧力の低下を測定し、添加剤による効果を比較した。

一般に生成速度を議論する場合には、物質移動が律速にならないように、まず攪拌速度を変化させて生成速度が最大限界になる攪拌速度の最小値を求める必要がある。これまでの研究例では容積300mlの装置について400～600rpm以上の攪拌が必要であると報告されていたため (Vysniauskas and Bishnoi, 1983), 本報告ではすべて一律1000rpmでの攪拌下で実験を行い、添加剤の影響について定性的な傾向を把握するという観点から測定を行った。

また、生成速度を議論する場合には、生成中の温度、圧力を共に一定に保った生成分解速度測定が必要で、圧力低下速度からの生成速度の推算は必ずしも最適ではない。これについても、本報告では初期圧力と温度、攪拌速度などの条件を一律に保った場合について、添加剤によるメタンのハイドレート化速度への影響を比較するという観点で測定を行った。

4. 結果および考察

1) 生成分解平衡線への影響

図1に各種添加剤共存下でメタン加圧により生成したハイドレートの生成分解平衡線図の例を示す。特に、3, 4-ジヒドロ-2H-ピランを水中に共存させてメタンで加圧した場合に生成したハイドレートの生成分解平衡線はテトラヒドロフラン(以下THF)を添加した場合(横井ら, 1993)よりもさらに高温低圧側であった。

以前の結果では、安定なハイドレートを生成する添加剤の分子径および濃度がII型構造に当てはまることから、生成した安定なハイドレートの構造は添加剤が主体となるII型構造で、メタンが12面体の中に取り込まれていると考えた(横井ら, 1993)。ところが今回の結果は分子径がII型の16

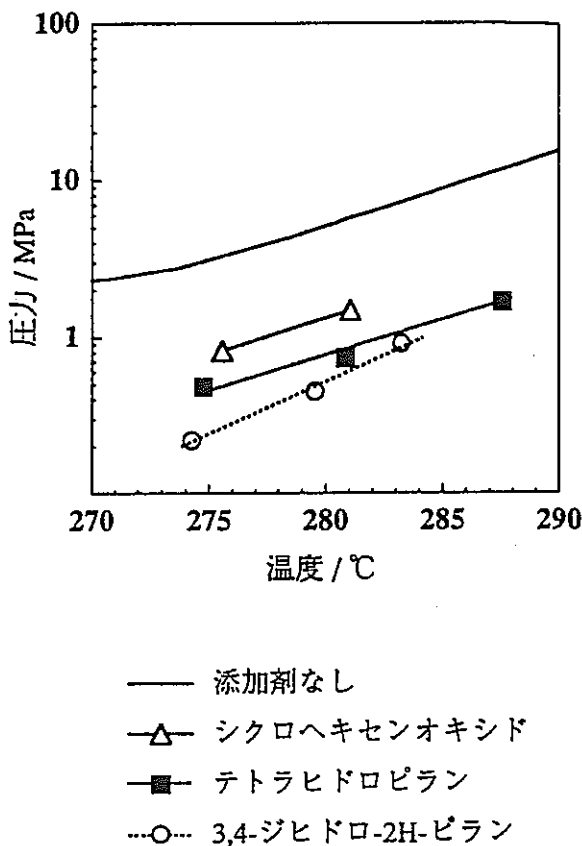


図1 添加剤共存下での、メタン加圧によるハイドレート平衡線図。

面体のかごには大きすぎる添加剤によっても安定なハイドレートが生成することを示している。

これはおそらくより大きい20面体のかごを有するH型構造のハイドレート (Lederhos *et al.*, 1992) が生成したためと考えられる。H型構造は、形の異なる二種類の12面体と大きい20面体のかごからなるハイドレートである。二種類の12面体には共にメタンが、また20面体には大きい添加剤分子が、それぞれゲストとして取り込まれると考えられる。

本研究においては、生成分解平衡線の挙動を分析した結果について、ハイドレート構造とあわせて考察することによりメカニズムの解明を検討しているが、本来ハイドレート構造の絶対的決定はX線回折 (Claussen, 1951; Pauling and Marsh, 1952; von Stackelberg and Muller, 1954; 本堂, 1994),

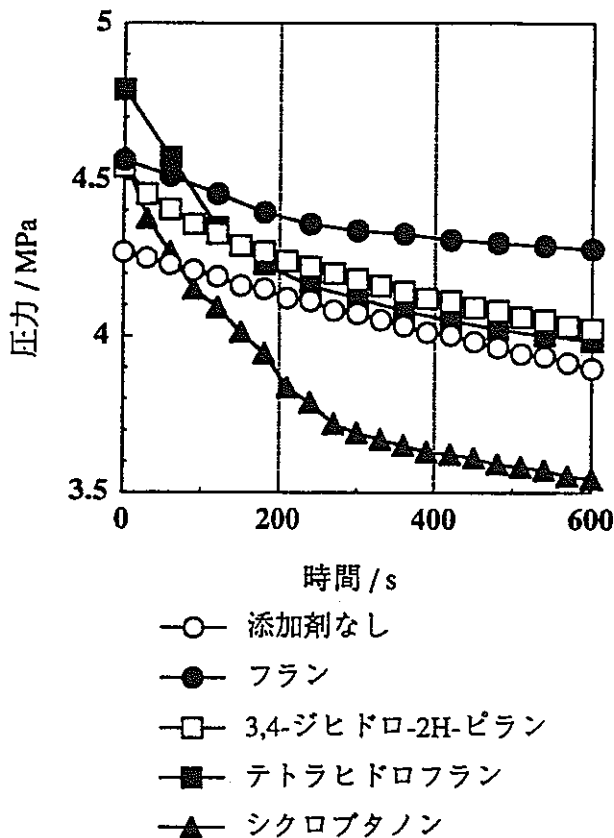


図2 添加剤共存下での、メタン加圧によるハイドレート生成に伴う気相圧力低下。

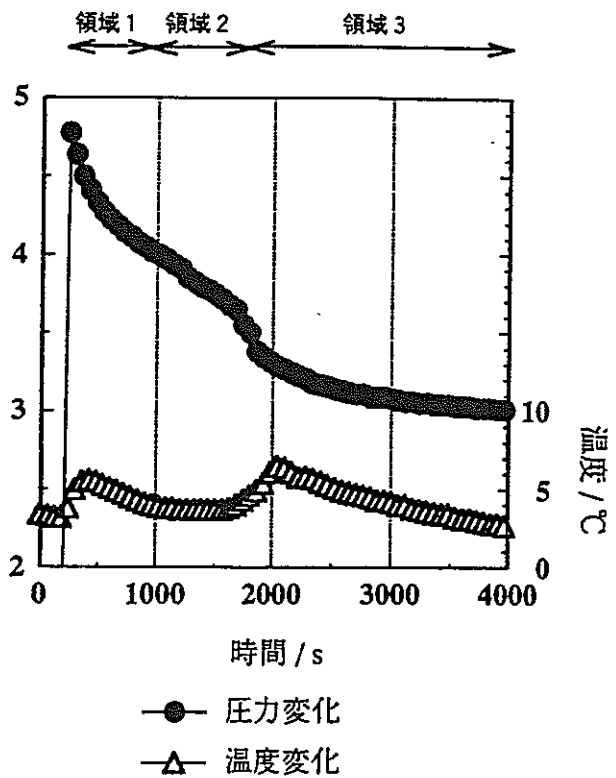


図3 オキセタン共存下での、メタン加圧によるハイドレート生成に伴う圧力温度変化。

NMR (Ripmeester *et al.*, 1980 ; Ripmeester, *et al.*, 1988), ラマン分光 (内田ら, 1993) などにより行われる。今後はこのような直接的構造解析手法による結果とあわせて検討を行う必要がある。

2) 生成速度への影響

各種の添加剤が水中に共存する場合の、メタン加圧によるハイドレート生成に伴う気相圧力の低下について、測定結果を図2に示す。

まず、ハイドレート生成による気相メタン圧力の低下は、水中に共存する添加剤により異なることが示された。しかも、添加剤のない場合と比較して速い場合と遅い場合との両方が観測され、この方法によりハイドレート化の加速と減速の両方を行える可能性が示唆された。ただし、この結果において、ハイドレートの生成速度とメタンの圧

力低下の速度とは必ずしも一致しない可能性がある。例えばTHFの場合、THFと水のみからでも十分安定なII型構造のハイドレートが生成するので、12面体のかごは特に充填されないままハイドレートが成長している可能性が高い。このように添加剤と水のみで十分安定なハイドレートを生成する場合には、ハイドレートの生成速度は速いにも関わらずメタンの圧力低下は遅いということが起こりうる。

また、各種の添加剤について、ハイドレート生成に対する平衡論的特性と速度論的特性は異なることが示された。すなわち、図2において、THF、フラン、シクロブタン共存下の各メタン圧力低下速度は大きく異なっているのに対し、このとき生成したハイドレート (II型構造で、12面体中に

メタン, 16面体中に各添加剤を含むと考えられる)の生成分解平衡線はほとんど同じ温度圧力関係にある(横井ら, 1993)。これは, 例えば各添加剤の水への溶解度や, 逆に純粋な添加剤のみの液体に対するメタンの溶解度といった物質移動, 接触効率に関わる要因が影響している可能性が大きいと考えられる(Kalogerakis *et al.*, 1993)。

なお, 方法のところでも述べたように, ハイドレート生成分解速度を議論する場合には圧力一定の条件での測定が必要である。特に, 今回のように添加剤の共存により構造の異なるハイドレートが生成する場合, 圧力が自由に減少する方式により速度を測定すると, 途中で複数の現象が重なった結果が測定されてしまう可能性がある点である。これについて, 図3を例に述べる。

初期圧力が十分高く, 純粋なメタンハイドレートも生成しうる温度圧力領域であれば, 純粋なメタンハイドレートと, 添加剤およびメタンを含むハイドレートとの両方が生成するので, 初期の段階では二種類のハイドレート生成に伴うメタン吸収が測定される(領域1)。その後次第に圧力は減少し, 同時に温度も上昇するため, 系内の温度圧力はメタンハイドレートの分解領域にはいる。この段階ではメタンハイドレートの分解によるメタンの発生と, 添加剤およびメタンを含むハイドレートの生成によるメタンの吸収との差し引き分が測定される(領域2)。さらに時間が経過しメタンハイドレートの分解が終了すると, 今度は添加剤とメタンを含むハイドレートの生成によるメタン吸収のみが測定されることとなる(領域3)。このように, この方法での生成速度測定により速度定数などを求める際には, 相当な処理をして現象単位に分割しなくてはならない。

5. まとめ

水相に水溶性有機物が添加剤として共存する場合について, メタンで加圧して生成するハイドレートの生成分解平衡線の測定と, 生成速度の測定を行った。その結果, メタンを安定にハイドレート化する添加剤の構造的傾向, およびメタン吸収速

度の添加剤による違いが示され, メタンを含むハイドレート相の平衡論的および速度論的性質が, 水相への添加剤により制御できる可能性が示された。

参考文献

- [1] Bond, D. C. and Russel, N. B. : Trans AIME, 179, 195 (1949).
- [2] Claussen, W. F. : J. Chem. Phys., 19, 259 (1951).
- [3] Davidson, D. W., Garg, S. K., Gough, S. R., Handa, Y. P., Ratcliffe, C. I., Repmeester, J. A., Tse, J. S. and Lawson, W. F. : Geochim. Cosmochim. Acta, 50-4, 619 (1986).
- [4] Deaton, W. M. and Frost Jr., E. M. : U. S. Bureau of Mines Monograph, 8 (1946).
- [5] 本堂武夫 : 日本結晶成長学会誌, 21-1, 105 (1994).
- [6] Kalogerakis, N., Jamaluddin, A. K. M., Dholabnai, P. D. and Bishnoi, P. R. : Proc. SPE, 375 (1993).
- [7] Kobayashi, R., Withrow, H. J., Williams, G. B. and Katz, D. L. : Proc. NGSAA, 27 (1951).
- [8] Lederhos, L. P., Mehta, G. B., Nyberg, G. B., Warn, K. J. and Sloan, E. D. : AIChE, 38, 7, 1045 (1992).
- [9] Mak, T. C. W. and McMullan, R. K. : J. Chem. Phys., 42, 2732 (1965).
- [10] 松本 良, 奥田義久, 青木 豊 : メタンハイドレート, 日経サイエンス社, 43 (1994).
- [11] McMullan, R. K. and Jeffrey, G. A. : J. Chem. Phys., 42, 2725 (1965).
- [12] 野口 肇 : 日本農芸化学会誌, 52, 4, 49 (1978).
- [13] Pauling, L. and Marsh, R. E. : Proc. Nat. (USA) Acad. Sci., 38, 112 (1952).
- [14] Ripmeester, J. A., Garg, S. K. and Davidson, D. W. : J. Magnetic Resonance, 38, 5387 (1980).
- [15] Ripmeester, J. A. and Ratcliffe, C. I. : J. Phys. Chem., 92-2, 337, (1988).
- [16] Sloan, Jr., E. D. : "Clathrate Hydrates of Natural Gas", Marcel Dekker, Inc., New York NY (1990).
- [17] Saito, Y., Kawasaki, T., Okui T., Kondo, T. and Hiraoka, R. : Proc. 2nd NGH, 459 (1996).
- [18] Thakore, J. L. and Holder, G. D. : Ind. Eng. Chem. Res., 26, 462 (1987).
- [19] 内田 努, 川端淳一, 加藤康明, 前晋爾, 本堂武夫 : 化学工学シンポジウムシリーズ, 38, 125 (1993)
- [20] von Stackelberg, M. and Muller, H. R. : Z. Electrochem., 58, 25 (1954).
- [21] Vysniauskas, A. and Bishnoi, P. R. : Chem. Eng. Sci., 38, 7, 1061 (1983).
- [22] Yamamoto, Y., Wakisaka, A., Saito, T. and Akiya, T. : Proc. 2nd NGH, 355 (1996)
- [23] 横井誠一, 奥井智治, 川崎達治, 高橋哲郎, 立岩幹雄, 横山成男 : 日本化学会誌, 4, 387 (1993).



SYMPOSIUM
ガスハイドレート

天然ガスハイドレートの 生成条件

前川 竜男
まえかわ たつお

猪狩 俊一郎
いがり しゅんいちろう

坂田 将
さかた すすむ

編集部

受理：1994年6月10日

筆者：地質調査所地殻化学部
地質調査所地殻化学部
地質調査所地殻化学部

天然ガスハイドレートの生成環境を推定するため、室内実験よりハイドレートの化学的性質（安定に存在する温度・圧力条件やハイドレート結晶の形成過程など）を解明する研究が行われている。

1. はじめに

ガスハイドレートはガス分子と水分子からなる氷状の固体物質である。ガスハイドレートの結晶は水分子がつくる籠状の格子にガス分子が取り込まれた構造をしている。この籠状格子はそのままでは熱力学的に不安定だがガス分子を内包することによって安定化される。氷とは異なりガスハイドレートはその結晶内部に多量のガス分子を取り込むことができる。ガス分子の種類がメタンであるものをメタンハイドレートと呼ぶ。天然に産するガスハイドレートは内包するガスの主成分がメタンであるのがほとんどである。

ガスハイドレートの研究の歴史は1810年にDavyによって塩素のハイドレートが発見されたことから始まる。それ以来、多くの化学者がガスハイドレートの物理化学的性質の解明を中心に研究してきた。ガス状の炭化水素であるメタン、エタン、プロパンのガスハイドレートは1888年にVillardによって発見されている。1930年代には、寒冷地の天然ガスパイプライン中でガスハイドレートが生成すると、天然ガスパイプラインを閉塞・破損させる原因となることがわかった。パイプライン中のガスハイドレートの生成を阻止するため、ガスハイドレートの生成条件（生成時の温度・圧力）を求める実験が数多く行われた。1960年代になると、シベリアのメソヤハガス田で、天然に産するガスハイドレートの存在が確認された。それ以来、高緯度地方の永久凍土の下盤堆積物中や、海域の深海堆積物中などに天然ガスハイドレートが広範囲に存在することがわかった。地球表層でガスハイドレートに貯蔵されている天然ガス量は、在来の化石燃料鉱床の約2倍と試算され（Kvenvolden, 1988）、将来の潜在的なエネルギー源として注目されている。今日では地球表層でのガスハイドレートの探査のため、またガスハイド

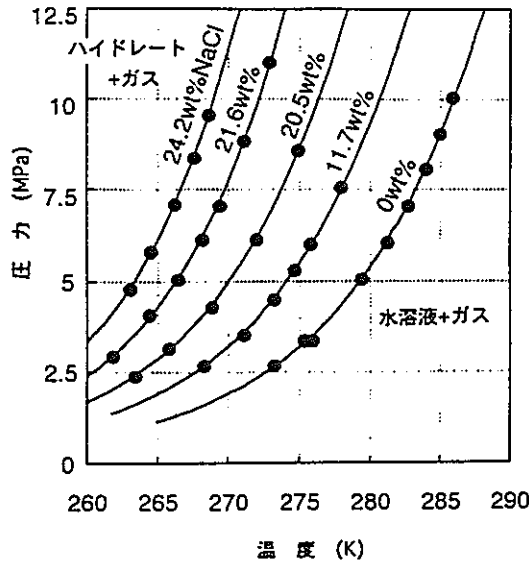
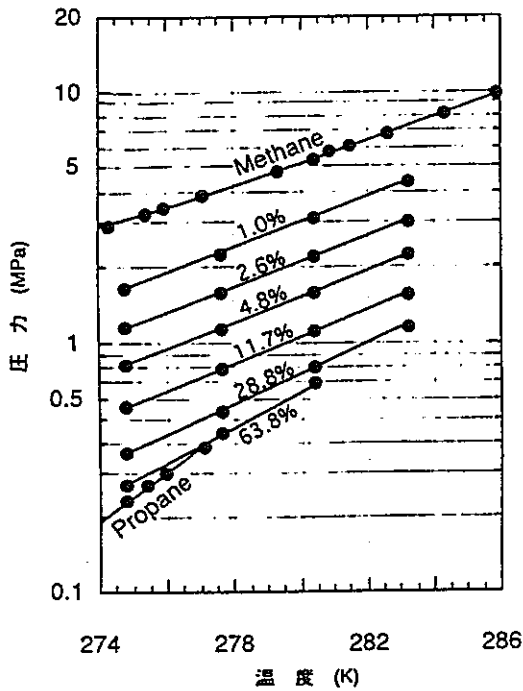
レートを分解し取り込まれている天然ガスを採取するために、ガスハイドレートの生成条件の変化を実験的に解明する研究が行われている。

2. ガスハイドレートの生成条件の変化

Hammerschmidtが、寒冷地の天然ガスパイプライン中でのガスハイドレートの生成がパイプラインの閉塞・破損の原因になると指摘して以来、天然ガスのガスハイドレートの生成条件を求める実験が数多く行われた（例えばDeaton and Frost (1946), Katz *et al.* (1959)）。ガスと液体の水から生成されるガスハイドレートの生成条件は温度-圧力図上では気相-液体の水相-ガスハイドレート相（V-Lw-H）の平衡曲線として表される。天然ガスの主成分であるメタンのハイドレートは低温・高圧の条件で存在し、0℃で2.6 MPa以上、10℃で7.2 MPa以上の圧力で安定である。また、メタンハイドレートの生成を阻害するために、メタンハイドレートの生成条件を変化させる実験も行われた。メタンハイドレートの生成条件を変化させる要因として主に次の二つがあることがわかった。それは1) メタンと他のガスの混合、2) 塩類やアルコール類などの水への添加、である。

1) ガス混合の効果

天然ガスは主成分のメタンの他にエタン・プロパン・二酸化炭素などのガスが含まれている。実際の天然ガス組成を考慮するため、メタンと他のガスとを混合し、その混合ガスのハイドレートの生成条件を求める実験が行われた。その結果混合ガスからハイドレートを生成するとその生成条件はメタンのハイドレートとは異なることがわかった。例えば、メタンに少量のエタンが混合するとメタンハイドレートは生成しやすくなる。つまり、メタンハイドレートの生成条件と比較してより高温・低圧の条件で生成するようになる。この効果は、温度-圧力図ではメタンハイドレートのV-Lw-H平衡曲線の平行移動で表される。メタンに他のガスが混合することでガスハイドレートの結晶構造が変化する場合は、より大きな生成条件の変化が現れる。例えばメタンに少量のプロパンが



(左) 図1 メタンとプロパンの混合ガスのガスハイドレート生成条件 (Deaton and Frost (1946) のデータより). 数字はプロパンのモル%. メタンに少量のプロパンが混合すると, より高温・低圧の条件でもガスハイドレートは生成される.

(右) 図2 水に NaCl を加えた時のメタンハイドレート生成条件の変化 (de Roo et al. (1983) のデータより). 数字は NaCl の重量%. NaCl 濃度が増加するにつれてメタンハイドレートのガス・水・ハイドレート (V-Lw-H) 平衡曲線はメタンハイドレートの生成しにくい方へ平行移動する.

混合するとこの混合ガスから生成するガスハイドレートの生成条件は高温・低圧側に大きく変化する (図1). 温度 10℃ でメタンハイドレートの生成に必要な圧力は 7.2 MPa だが, わずか 1% のプロパンでも混合するとそのガスハイドレートの生成条件は 4.4 MPa となり, 生成圧力が 2.8 MPa も減少する (Deaton and Frost (1946)). これはメタンハイドレートが構造 I のハイドレート構造をとるのに対し, プロパンが混合したガスハイドレートは構造 II のハイドレートを生成するため, その結晶格子の生成エネルギーが大きく変化したためである.

2) 水の添加剤の効果

i) 塩類による効果

ガスハイドレートの生成条件を変化させる要因の一つに水の塩分濃度がある. 深海堆積物中に天然に存在するガスハイドレートは海水 (堆積物間隙水) の存在環境で生成するが, それは純粋な水から生成した条件とは異なる. Claypool and Kaplan (1974) は, ほぼ海水と同じ塩分濃度である 3.5% NaCl 水溶液からメタンハイドレートを生成すると, その生成条件は純水のメタンハイドレートよりも低温・高圧な条件が必要となるこ

とを示した. NaCl 塩分濃度に対するメタンハイドレートの生成条件の変化は de Roo et al. (1983) によって報告されている (図2). 彼らの実験によると, メタンハイドレートは 5 MPa の圧力で, 純水から生成すると 6.2℃ の温度で生成するが, 11.7 wt% NaCl 水溶液では 1.0℃, 20.5 wt% NaCl 水溶液では -3.0℃, 24.2 wt% NaCl 水溶液では -9.9℃ と生成温度の低下が見られた. これらの効果は水分子のクラスター構造の面から次のように説明されている.

水分子は水中では互いに水素結合で結びついたネットワーク構造をしている. 溶存したガス分子は水分子とファンデルワールス力で結合していて, 水のネットワーク構造の中に取り込まれている. NaCl などの塩類は水に溶解すると解離してイオンになる. イオンは, ガス分子が水分子と結合するファンデルワールス力より強い力で水分子と結合する. このため水分子が溶存したガス分子の周囲にハイドレート構造を形成することが困難になる. 一方, 塩類が水に溶解すると水へのガス分子の溶解度が減少する. この両方の効果で, 塩類を含む水溶液から生成したハイドレートは純水から生成したハイドレートよりも生成しにくく, より

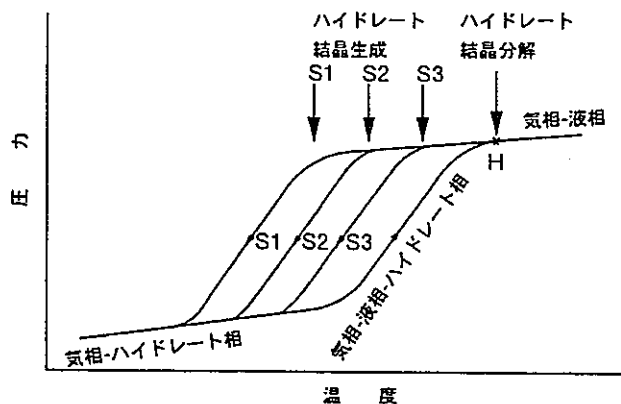


図3 ガスハイドレート生成時の温度-圧力状態変化曲線 (Schroeter *et al.*, 1983). ガスハイドレートの生成・分解を継続して数回 (S1-S3) 行くと、次第に水の過冷却の程度が小さくなっていく。この現象は、ガスハイドレートを分解した水の一部にハイドレート構造が残っており、継続してガスハイドレートを再生成した時の生成核となるために起きる。

高い圧力と低い温度が必要になる。温度-圧力図では、塩類を含む水溶液から生成したハイドレートの V-Lw-H 平衡曲線はハイドレートが生成しにくい方へ平行移動する。Makogon (1974) によると、塩類によるハイドレートの生成阻害効果は、イオン電荷に比例し、イオン半径に反比例する。最も効果的なハイドレート生成阻害剤は最大電荷をもち最小半径をもつイオンである。

ii) アルコール・グリコール類による効果

アルコール類がガスハイドレートの生成を阻害するのは、アルコールの水酸基が周囲の水分子と水素結合し、水分子が溶存したガス分子の周囲にハイドレート構造をつくるのを妨げるからである。Katz *et al.* (1959) はアルコールの阻害剤としての効果はアルコールの揮発性ととも高まることを示した。すなわちメタノールが最も効率が良く、次にエタノール、イソプロパノールの順である。

グリコール類もアルコール類と同様、多くの水酸基をもち水分子と水素結合する。このため水分子が溶存したガス分子の周囲にハイドレート構造をつくることを妨げるように作用する。効果的なハイドレート生成阻害剤としての利用は、ハイドレートの生成阻害効果と同時に、使用する際の費用の面からも考慮されなければならない。Ng and Robinson (1983) はメタノールが水溶液中では

等量のグリコールよりもハイドレートの生成を阻害する効果が大きいことを示した。

3. ガスハイドレート生成時の水の準安定状態

これまでの数多くの実験から、ガスハイドレートが生成する時、大きな過冷却やまたは過圧縮を必要とすることが知られている。伊藤 (1993) はステンレス製の耐圧容器内でメタンガスと液体の水からメタンハイドレートを生成し、ハイドレートの生成には水の過冷却状態が必要であることを示した。ガスハイドレート生成時の水の準安定状態の必要性とともに、水中でのハイドレート構造の形成過程やハイドレート結晶の成長について物理化学的側面からの研究が行われている。

Schroeter *et al.* (1983) は、ガスハイドレートを何度も生成・分解すると図3のような温度-圧力状態変化曲線が得られることを示した。ガスと水を含んだ容器を冷却しガスハイドレートを生成したとき、一回目は S1 と示された状態曲線を経る。つぎに容器を温め、ハイドレートを分解すると、その状態曲線は生成時の曲線とは異なる。H 点でガスハイドレートの結晶が消失する。再び温度を下げてもハイドレートを生成すると二回目は一回目よりもより高温・低圧でガスハイドレートが生成する。このことはガスハイドレートの生成時の水の過冷却の程度が小さくなっていることを示す。このように実験の度にガスハイドレート生成時の水の過冷却の程度が小さくなっていることについて Makogon (1974) は以下のような説明をしている。

ハイドレート結晶の生成は、水中で水分子のクラスターが合併しハイドレート構造の核を形成することから始まる。ガスハイドレートの V-Lw-H 平衡温度より冷却しても、水はハイドレートに変わらず、液体の水として一時的に準安定的に存在する。しかし一旦、ハイドレート核が形成されるとガスハイドレートの結晶化が促進される。結晶化の継続は温度-圧力条件や冷却速度に依存する。再び温度の上昇や減圧によってガスハイドレート

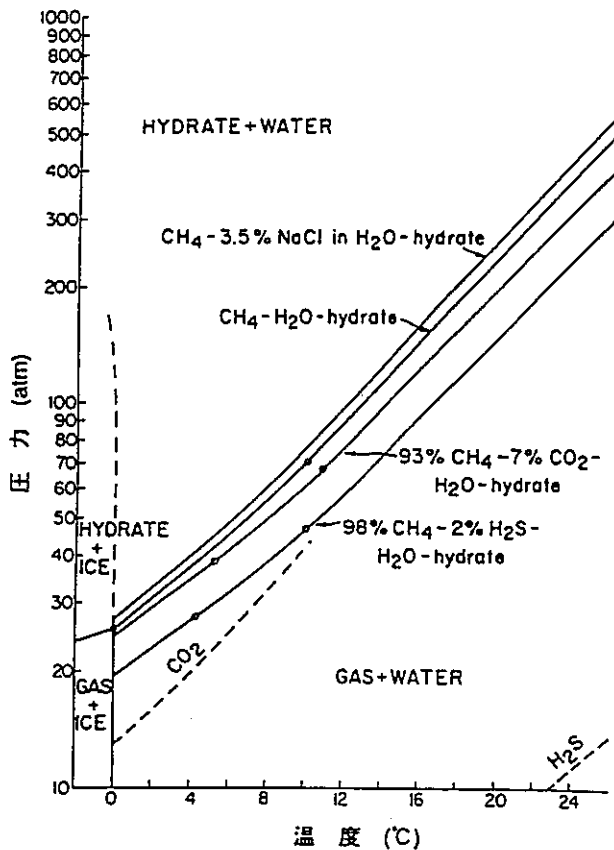


図4 ガスハイドレートの生成条件に及ぼすガス混合や水の添加剤の効果 (Claypool and Kaplan, 1974).

結晶が分解しても、ハイドレート構造をもつクラスターは完全には分解せず、水中にその構造を一部残している。一度ハイドレートを分解した水からガスハイドレートを再生成した時、水の過冷却の程度は小さくなり、ガスハイドレートが生成しやすくなる現象は、水中に一部残っていたハイドレート構造が再度ハイドレートを生成するときの核になるためである。このハイドレート構造の消滅の程度は水の温度と分解してから時間に比例する。この水分子がつくるハイドレート構造のクラスターは温度が35℃以上になると完全に消失する。

ガスハイドレートの結晶は、ガスと水の界面から成長を始める。メタンのハイドレートの場合はその密度が水よりも軽く(0.92 g/cc)、水面でメタンハイドレートの薄膜状の結晶を生成する。水面で生成したメタンハイドレートの結晶は水内部

に向かって成長を始める。水相へのガスの供給は薄膜状のメタンハイドレート結晶を通して行われるが、メタンハイドレートの浸透性が低いため、メタンハイドレートの成長速度は次第に遅くなる(Makogon, 1974)。

4. 今後のガスハイドレート合成実験

天然のガスハイドレートについて、Claypool and Kaplan (1974) は深海堆積物中でのガスハイドレートの生成条件は、ガス混合の効果と塩類によるハイドレート阻害剤としての効果が相殺され、純水から生成したメタンハイドレートの生成条件とほぼ一致するとみなせると仮定した(図4)。しかし、熱分解起源のガスから生成するガスハイドレートの生成条件は少量のプロパンを含んでいるのでその生成条件は大きく変化している可能性がある。実際の天然に産するガスハイドレートは様々な成分が混合している場合があり、今後は天然のハイドレート生成環境をより正確に模した合成実験が必要である。

参考文献

- [1] Claypool, G. E. and Kaplan, I. R. : The origin and distribution of methane in marine sediments. in *Natural Gases in Marine Sediments* (I. R. Kaplan ed.), Plenum, New York, 99 (1974).
- [2] Deaton, W. M. and Frost, E. M. : Gas hydrates and their relation to the operation of natural gas pipe lines. U. S. Bureau of Mines Monograph 8 (1946).
- [3] de Roo, J. L. et al. : Occurrence of methane hydrate in saturated and unsaturated solutions of sodium chloride and water in dependence of temperature and pressure. *AIChE. J.*, 29, 651 (1983).
- [4] 伊藤司郎 : 日本地質学会講演予稿集 (1993).
- [5] Katz, D. L. et al. : *Handbook of Natural Gas Engineering*. McGraw-Hill, New York, 802 pp (1959).
- [6] Kvenvolden, K. A. : Methane hydrate-A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem. Geol.*, 71, 41 (1988).
- [7] Makogon, Y. F. : *Hydrates of Natural Gas*. Moscow, Nedra, Izdatel'stvo, 208 pp (1974), translated from the Russian by W. J. Cieslesicz, PennWell Books, Tulsa, Oklahoma. 237 pp (1981).
- [8] Ng, H.-J. and Robinson, D. B. : *Gas Proc. Assn. Rsch Rpt* 66, April (1983).
- [9] Schroeter, J. P. et al. : Hydrate decomposition in the system hydrogen sulfide-methane-propane. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 22, 361 (1983).
- [10] Sloan, E. D. : *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Marcel Dekker, Inc., New York, 664 pp (1990).

昇降機技術の展望

渡辺英紀

1. まえがき

安全装置付きの近代エレベーターが世の中に出て約100年、エスカレーターが発明されて約90年たった。今世界中では約400万台のエレベーター、エスカレーターが稼働していると推定される。今ではエレベーター、エスカレーターは、単なる輸送手段ではなく安全性はもちろん、エネルギーの低消費、ファッション性も重要になってきている。

一方、超高層ビルブームの再来ともいえる時期を迎え、エレベーターもインテリジェントで、かつ超高速のものが要求されている。また、21世紀には1,000m以上の空中や大深度地下の利用が考えられており、エレベーター、エスカレーターも従来とは異なるものが要求されよう。

そこでこの論文では、現状を踏まえて今後の課題を考え、技術の進む方向を探ってみたい。

2. 現 状

世界の昇降機の需要は、概略日本3万台、米国2万台、欧州5万台、東南アジア1.2万台、その他合計で14万台程度といわれているが、実に1か国だけで3万台もの需要があるのは日本のみである。特に我が国は、ここ数年の伸びが著しい。一般に5階以上の建物には、エレベーターが設置されていることが多い。そこで図1に示すように、5階以上の建築

物棟数とエレベーター設置台数の年次別変化を比較してみると、両者の傾向は極めて類似していることが分かる。しかし、ここ数年は建築物棟数に比べ、エレベーター設置台数の方が増加傾向がかなり大きくなっている。すなわち、エレベーターの台数を従来よりも増やす建物が増加している。

日本の昇降機は、量の拡大のみならず、オイルショックという大きな試練を受けながら、その試練をてこ(梯子)にして技術的にも大きな進歩を遂げた。代表的なものが、VVVFインバータに代表される駆動制御技術と、マイクロコンピュータを利用した群管理技術の進歩である。

現在では、昇降機は単に乗客を運ぶための手段ではなく、多様な可能性が追究されている。例えば、建築空間の造形モチーフとしてスパイラルエスカレーターを設置したり、インドアオープンエレベーターをビルの吹抜け部に設けて快適空間を演出している。図2は、近年の展望用エレベーターの伸びを示した図であるが、このように乗る人に飛しょう(翔)感を与える展望用エレベーターの需要も一層増大している。また、面白さや、情報の提供をするために、かごや乗り場に設けられたインテリジェントオプション、さらには個人あるいは企業の安全性を確保するためのセキュリティチェック機能も充実されてきた。さらに、昇降機の利用分野も拡大し、老人、身障者はもとより一般従業者にとっても快適な居住空間創出のニーズにこたえたホームエレベーターが増

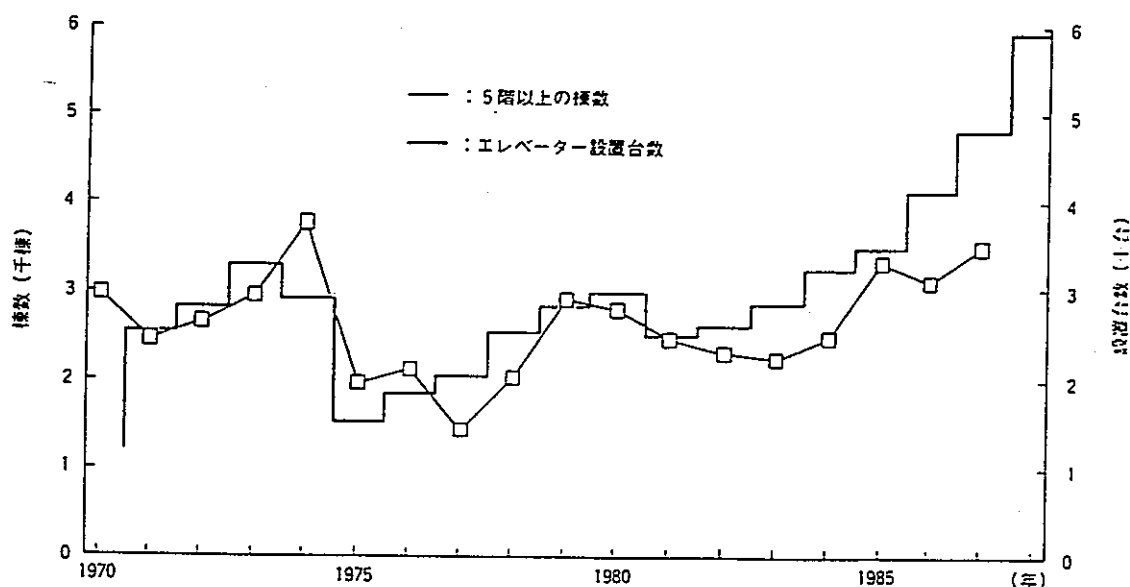


図1. 5階以上の建築物棟数とエレベーター設置台数の年次別変化

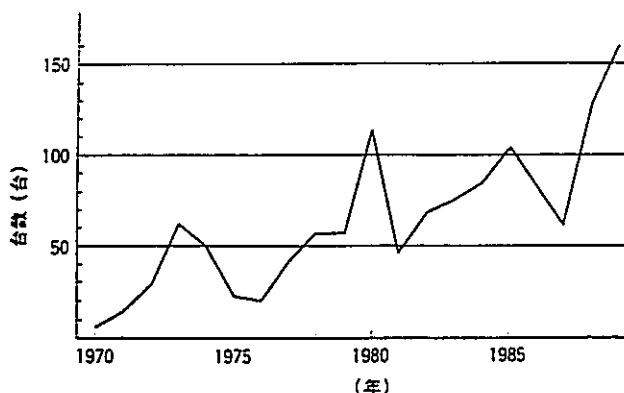


図2. 展望用エレベーターの設置台数の年次別変化

大している。

3. 今後の動向

前述のようなトレンドを踏まえ、昇降機の今後の動向について述べてみたい。

第一は、新しい概念の昇降機新機種の開発ということである。当社は1990年3月に、従来の規格型の概念を止揚し、“人に優しい”を開発コンセプトとした〈グランディ〉シリーズを発表した。このシリーズは乗り心地や操作性・利便性が一段と向上しており、より豊富なデザインも用意されて顧客の多様な要求にこたえられるようになっている。もちろん、これを支えるのは機械技術、インバータ技術、マイクロコンピュータを使用した分散化・ネットワーク技術である。今後、このように新しい概念の昇降機が、続々と市場に登場するのではないかと考えられる。

第二は、ビルの超高層化に伴うエレベーターの超超高速化への対処ということである。

既に当社は、1977年に600m/minという世界で最も速いエレベーターをサンシャイン60ビル(東京)に納入した。この記録は、今もって破られていない。しかし、近年第二次超高層ビルブームを迎え、さらに高いビルが計画されるに及んで、エレベーターの速度も一層速いものが要求されるようになった。その一例として、近々横浜“みなとみらい21”地区に建設されるランドマークタワーにサンシャイン60ビルの600m/minをしのぐ超高速エレベーターを納入する予定である。これは、またまた昇降機の速度の歴史を塗り替えるものになる。図3に当社エレベーターの高速化の歴史を示す。1977年のサンシャイン60ビルまでのエレベーターは、ワードレオナード駆動方式(いわゆるMG方式)による高速化の歴史であった。次いで、1977年ごろからサイリスタレオナード方式による高速化が始まったが、ちょうど超高層ビルブームの端境期で、エレベーター速度も360m/minが最高速であった。1986年ごろからVVVFインバータ方式が取り入れられ、第二次超高層ビルブームを迎えた今日この駆動方式が主流となっている。

ところで、現在の方式のエレベーターの揚程、速度の限界

はどの程度であろうか。

エレベーターの昇降に伴い、かご内の気圧が変化する。この気圧変化に対して、普通の人がかごまで我慢できるかか揚程の一つの限界となる。図4は、この限界を見極めるために行ったシミュレーションの結果である。航空自衛隊の瞬間減圧装置を用いて、エレベーターを昇降させた時に生じる気圧変化と同じ気圧変化をかご内の被験者に与えて、耳詰まりの影響を調査したものである。この結果から、耳詰まりは揚程との関係が強く、エレベーター速度との相関は少ないことが分かる。実験では、揚程400mでも耳詰まりを訴える人が若干いる。しかし、この程度の揚程のエレベーターは、米国で多数使用されており、耳詰まりが特に問題になったという報告はない。さすがに揚程1,500mを一気に走行すると、大多数の人が下降時に耳詰まりを訴えることになる。もしこのようなエレベーターが計画されるときは、例えばビル側で気圧調整を行う等何かの対策が必要となろう。

なお、実際のエレベーターで速度を変えて耳詰まりの影響を調査した例もあり、ここでも同様に速度の違いによる差異はほとんど見られないと報告されている。

次にエレベーターが、現在のようにロープでつる(吊)された構造を採用する限り、ロープの破断強度で揚程の限界が決まる。すなわち、ロープの自重によって自身の重みを支えきれなくなる。特に、エレベーターの場合には、ロープに対して破断強度の10倍以上というような十分な安全率が法規によって要求されるので、通常の構造及び材料のロープを採用する限り1,000m程度が一つの限界となろう。

なお、400mの揚程があれば、理論的にはエレベーターの最高速度は1,000m/minが出せることになるので、将来あるいは実現するかもしれない。

第三には、よりインテリジェント化が進むであろうということである。マイクロコンピュータの進歩によって、AI、すなわち人工知能を用いたエレベーターの群管理は既に実用期に入った。今後は、ニューロコンピュータの実用化によって一層の高性能化が進もう。単に群管理性能の向上のみならず、オートチューニング技術の進歩でエレベーターの走行性能も格段に飛躍し、経年変化による性能劣化も防止できよう。

第四には、昇降機分野で今最も問題になっている据付け省力の問題に触れてみたい。昇降機は、ビルに直接取り付けるものであるから、最終組立てがビルの工事現場とならざるをえない。しかし、最近の風潮として、工事現場の作業のような、きつくて危険な作業は若い人に嫌われ、据付け人工が極めて不足している。この解決のためには、極力工場でのプレハブ化を行う必要がある。欧州では、エスカレーターは、工場ですべて組立後一体輸送するのが普通であるし、かご室も工場ですみ上げ一体で現場に搬入している例も多い。さらに、英国ではモジュラタイプと称し、工場で作製した昇降路を各階ごとに積み上げる方式も用いられている。いずれに

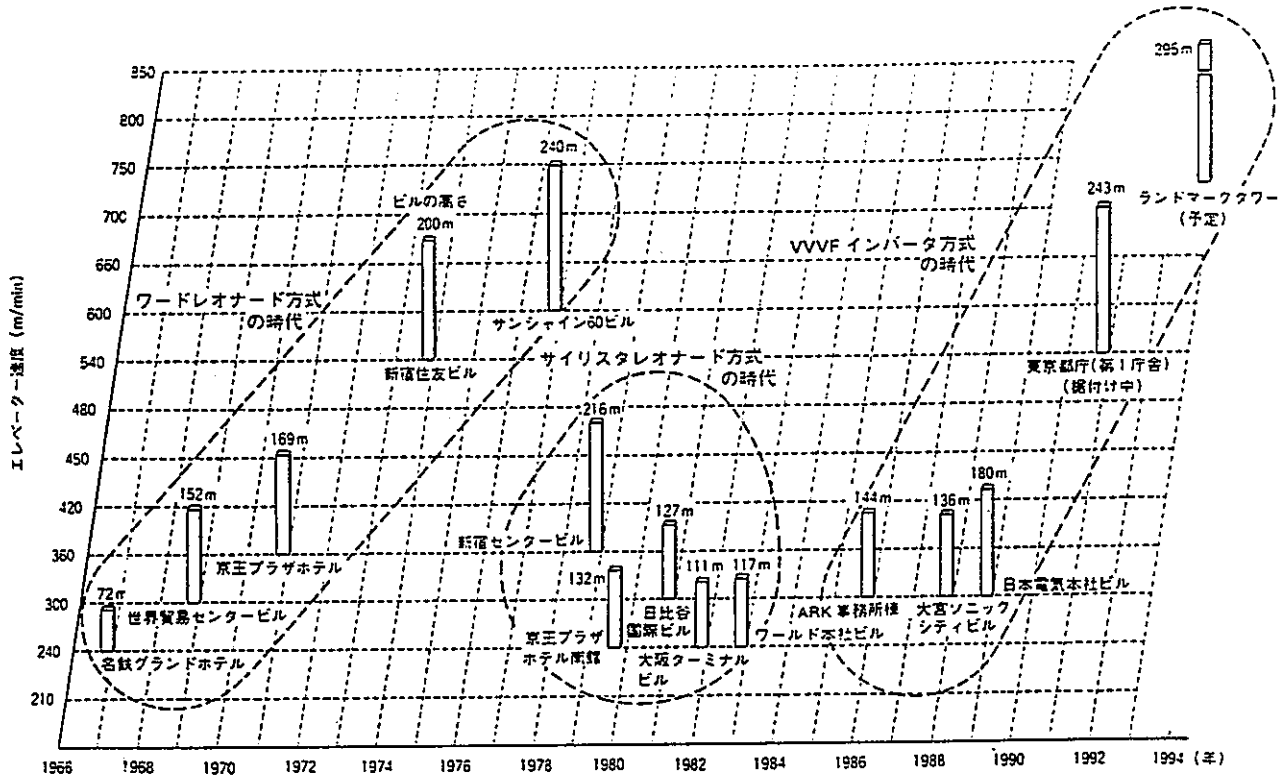


図3. 三菱電機製超高速エレベーター

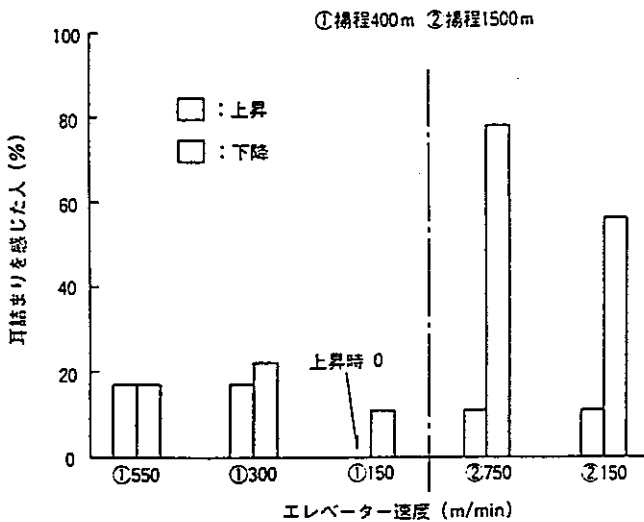


図4. 気圧変化の人体に及ぼす影響の実験

しても、プレハブ化は物が大きくなるので、輸送はもとより建物への搬入が問題である。プレハブ化が成功するか否かは、建物側の配慮に負うところが大きい。今後関係方面の協力を得ながら検討を進めたい。

4. 21世紀のエレベーター、エスカレーター

かって20世紀の初頭、人々は20世紀の科学を予言した。明治34年(1901年)の報知新聞には“20世紀の予言”として幾つかのものが挙げられている。例えば、①無線電信電話の普及、②遠距離の写真(テレビ)、③7日間世界一周、④蚊及びのみ(蚤)の滅亡、⑤暑寒知らず(エアコン)、⑥写真電話(テレビ電話)、⑦電気の世界(しん(新)炭、石炭

なし)、⑧鉄道の速力は神戸東京間2時間半、⑨市街鉄道としては馬車鉄道がなくなり、空中(モノレール)及び地中を走る、⑩自動車の世、等々である。もちろん、中には予言の当たっていないものもあるが、結構実現しているのに驚かされる。さて、21世紀の昇降機を予言するのはおこがましいが、二つばかり挙げてみたい。

まず、将来1,000m級の超高層のビルが出現した時には、一つの昇降路(シャフト)内に数台のエレベーターを走行させる、いわゆるワンシャフトマルチカーが有効になると考えられる¹¹⁾。

この実現のためには、ロープを使わない駆動方式が必要であり、必然的にリニアモーター駆動となろう。図5は、その一つのアイデアである。しかし、安全性とのかかわり合いや、経済性の問題等解決すべき点が多々あり、電気設備学会統計調査委員会の予測¹²⁾では、2005年ごろとなっている。このようなロープのないエレベーターでは、当然制御ケーブルも用いられず、かごの制御には無線あるいは光が用いられよう。また、高温超電導を利用したリニアモーターやかご用のエネルギー蓄勢装置が実用化されれば、現在のエレベーターシステムの構造も相当変革されよう。

一方、目を転じて、エスカレーターに代表される移動階段や(トラベーター)の商品名で呼ばれている移動通路はどうであろうか。当社は世界で初めて、スパイラルエスカレーターを開発し、エスカレーターを単なる交通手段からファッション製品に変身させた。短距離交通手段としての変革も今後要求されよう。欧米では輸送力を上げるために、速度が最高

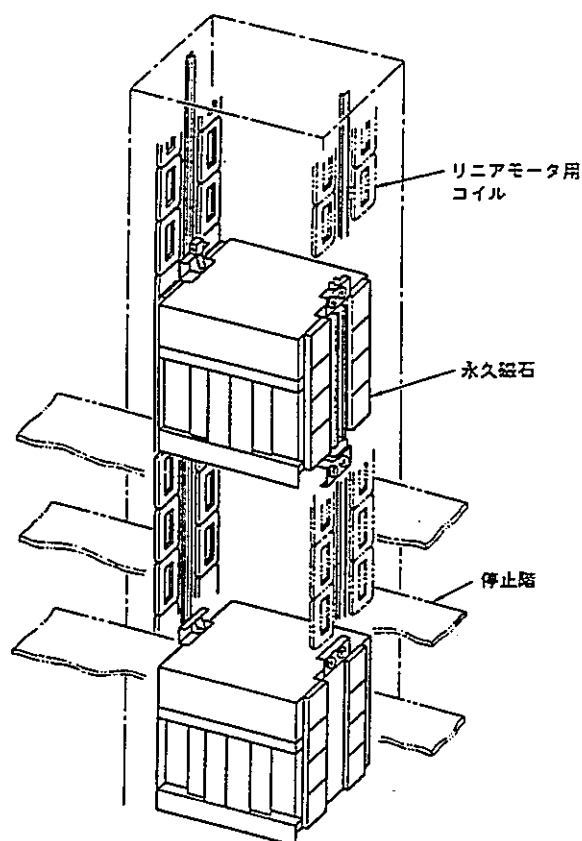


図5. ロープレスリニアモーター駆動エレベーターの1アイデア

54m/minのエスカレーターや傾斜角35度のものも実用化されている(ちなみに我が国では、速度は通常30m/min, 特別な場合でも40m/min, また傾斜角は30度までしか許されていない)。特に安全性確保から乗り込み、降車時の速度はあまり速くはできないが、乗り込んだ後の中間部の速度

を速くしたいという願望は昔からあった。フランスで“TRAX”の名で開発されていると言われている移動通路が、その一例である⁽¹⁾。しかし、安全性確保等の技術的問題点が解決されておらず、いまだ実用にはなっていない。

いずれにせよ1km程度の近距離を、途中で自由に乗り降りできるような連続輸送装置が、ハイテクによって安全に実現できれば、都市計画上也大いに自由度が広がるであろう。

5. むすび

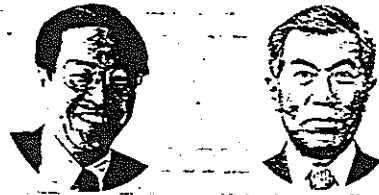
以上昇降機の展望について述べた。当社は昇降機のリーディングメーカーとして、市場のニーズにこたえる新しい昇降機を開発するのはもちろん、計画段階から需要家各位と一体となって設計し、より快適で便利なビルや都市の実現に貢献していく所存である。また、その計画に必要な技術やツールの開発にも取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) 前島 修, 古川修文, 後藤剛史, 出口清孝: 高速エレベーターの乗り心地に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 753 (1978-9)
- (2) Sturgeon, W. C.: Modular Lifts in the Old Bailey, Elevator World, 34 (1990-6)
- (3) 山村 昌: 電気学会100年の回顧と展望, 電気学会誌, 108, No. 8, 740 (1988)
- (4) 電気設備学会統計調査委員会: 電気設備の技術動向調査報告書, 電気設備学会誌, 89 (1987-2)
- (5) World's First Accelerating Walkway will enter Service in 1981, Elevator World, 22 (1980-3)

ロープレスエレベータ は可能か

エレベータ、リニアモータ、リニア同期モータ
高層ビル



海老原大樹 正田 英介

1. まえがき

有史以来といわれる激しい地震が神戸を中心に起こり、多くの住居をみじんに砕いてしまった。一番の被害は古い木造家屋であり、密集地ゆえの大火災へと波及していった。その一方、人工埋立地に建つ高層ビルは新しい耐震基準で設計されていたので、一部の壁に亀裂などが生じたものの、基本的に建物としての健全性を保っているようである⁽¹⁾。

このような状況から各地の下町を中心とする超過密都市では防災上、緑地などの空間を有する集合住宅への変更が有効といわれている。一方、建物を高層化して余地を緑地にすれば都市のヒートアイランド化現象を緩和するだろうともいわれている。

このような考え方をさらに発展させ、空間を有効に活用して、自律的で環境性の高い都市造りを実現しようという表紙のような超超高層ビルの構想が大手建設会社から表1にまとめる多様な都市概念の下に提案されてきた⁽²⁾。このように高さが数百mを超えるビルでは、数万人オーダの人々がそこで働き生活するから、縦方向の輸送システムが重要な役割を果たすことになる。これを従来型のエレベータで構築しようとする、一つのエレベータシャフトに1個のかごしか運転できないので、エレベータの占める空間が大きくなって建物の有効面積が減少する。多数のかごが一つのシャフトの中を普通の鉄道と同じような運転モードで動く縦形の輸送システムが必要となる。同時に800m以上のビルでは物理的にロープを使用するのが不可能であ

えびはら・だいき (正員) 1962年武蔵工業大学卒業。工学博士。武蔵工業大学電気電子工学科教授。電気学会 構造物関連縦型リニア技術協同研究委員会副委員長。IEEE 会員。日本AEM 学会会員。

まさだ・えいすけ (正員) 1965年東京大学大学院数物系研究科修了。電気工学専攻博士課程修了。工学博士。東京大学教授。電気学会 構造物関連縦型リニア技術協同委員会委員長。IEEE 会員。VDE 会員。

表1 超超高層都市構想

計画名 (計画発表時期)	計画のコンセプト	規模	
		高さ(m) 延床面積(ha)	人口(万人) 就業居住
スカイシティ 1000 (1989.7)	都市空間の立体利用：都市機能と自然の両立した理想都市	1,000(約200階) 800	10~13 3.5
エアロポリス 2001 (1989.8)	未来の空中都市：過密都市問題を解消し、グローバルゼーションに対応	2,001(500階) 1,100	30 14
ミレニウムタワー (1990.7)	過密都市の諸問題を解決すべく、海上に計画された複合立体都市	800(150階) 96.3	1.7 0.2
DIB-200 (1990.9)	50階建のシリング状：超超高層ビルをユニットとして12ユニットを連結して構成、未来ビルの一つのあり方の提案	800(200階) 約150	4.5
X-SEED 4000 (1990.11)	生活機能と都市機能を完備し、自然と共に生きていくことをテーマとした超超高層未来都市	4,000(約800階) 5,000~7,000	30~50 50~70
TRY 2004 (1991.1)	自然の大地をそのままに光と風を最大限に取り入れた100万人の空中立体都市構想	2,004(約500階) 8,800	100
TAISEI 100 (1991.6)	新しい超超高層ビルのプロトタイプを目指す	480(100階) 35	
ステップオーバータワー (1991.8)	道路、鉄道、河川などの都市インフラや既存の建物の上部に建設できるという提案	800(約160階) 132	8

り、またロープレスエレベータは車輪の粘着力では垂直に動かさない、駆動のためにリニアモータを使用せざるをえない。しかし、リニアモータがかごの重さに対抗して十分な推力を発生できるのか、現在のエレベータと同様の乗心地や各階での停止精度が得られるか、停電などの異常に十分な安全性を持つのか、などロープレスエレベータの技術的な可能性には応えるべき問題点が少なくない。電気学会の縦型リニアドライブ協同研究委員会など⁽³⁾での検討を中心に、以下ではロープレスエレベータのコンセプトとその技術的可能性を紹介しよう。

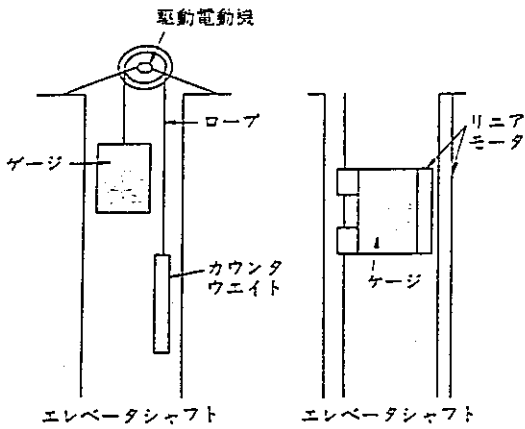


図1 ロープレスエレベータの概念図

2. ロープレスエレベータ

図1(a)に示すように、エレベータは乗客の使うかご(ゲージ)と釣り合いおもり(カウンタウエイト)とをロープで結んで、つるべのように動かして、かごの加減速に必要な駆動力だけを駆動電動機から供給する。このような構成により、エレベータシャフトにはカウンタウエイトの移動のスペースが、シャフトの頂上部には機械室が、それぞれ必要になる。もちろん、一つのロープでは一組のかごしか駆動できない。

これに対して、自力でシャフト中を昇降する図(b)のようなロープレスエレベータが実現したとすれば、これらのスペースが不要になる上に、一つのシャフト内に複数のゲージを運転でき、分岐装置との組み合わせで急行・鈍行など多様なモードでの運用が可能になる。ロープで巻き上げる駆動方式はとれないので、リニアモータで直接にかごに昇降に必要な推力を与える。

このようなロープレスエレベータが技術的に可能であるかを述べるまえに、カウンタウエイトをもつエレベータの駆動方式の特長をまとめてみよう。定速走行状態では走行抵抗を無視すれば駆動系からはかごとカウンタウエイトのロープを含めた不釣り合い分だけの推力を加えればよく、エネルギーをあまり必要としない。加減速時にはかご、カウンタウエイト、ロープの全質量に一定の加減速度を与える推力が求められる。高層ビルになってロープの質量が大きくなると、特定の位置ではロープレスエレベータに匹敵する加減速度が必要になる。

ロープレスエレベータでは、かごの駆動に必要な加減速度をリニアモータで与えられるか、ロープがなくても安全か、という二つの問題が答えられなければならない。前者については次章に詳しく述べるとして、安全について考えてみる。

通常のエレベータでもロープが切断された状況を想定し

て、機械的な非常停止装置と衝突緩衝器の二重の安全装置をもっている。ロープレスエレベータでも同じ機構は必要であろうが、リニアモータが停電・駆動系の不具合で推力を失う確率はロープの切断より高いはずであるから、駆動システムとしての対応が要求される。電力システムでは多重給電・電力貯蔵装置の併設などの技術の取り込みが必要である。同時に繰り返し使用に耐える非常停止装置が必要だが、これは構造上はすでに実用化されているリニアモータ駆動のエレベータと同じと考えてよいであろう⁽⁴⁾。

3. 縦輸送と駆動用リニアモータの適合性

3.1 ロープレスエレベータ用リニアモータの位置付け

検討すべきロープレスエレベータの仕様は現行のロープ式の諸元を参考に駆動速度7m/s、積載荷量2,000kg(30人)、1行程200m、加速度0.1Gとした。

リニアモータの設置には固定子の配置の違いから、“昇降路1次式”と“かご1次式”に大別できるが、前者はシャフト全長にわたりリニアモータの1次コイルを設置する必要があるが、かご重量を軽減できる。これに対し後者は、集電を必要とするばかりでなく、かご重量が過大となり、輸送能力に限度を有する。

これら数トン、もしくは10数トンものかごが駆動可能なリニアモータとしては、リニア誘導モータ(LIMと略す)と、リニア同期モータ(LSMと略す)がある⁽⁵⁾。LSMでは界磁の違いにより永久磁石形や超電導磁石形が有効であるが、前記委員会ではこれらの機種別および駆動方式別に定量的な比較を行ったのでその結果を表2に示す。

LIM昇降路1次式の場合には2次導体の発熱が大きく、乗客輸送の面で問題がある。その結果、さうに信頼性を加味し、永久磁石LSM昇降路1次式が良好と判断した。

3.2 昇降路1次方式、永久磁石形LSMの設計

次に前記のエレベータ仕様に対し、ロープレスリニアエレベータの具体的検討を行った。

リニアモータの配置の検討にあたっては、①昇降路の水平投影面積を極力小さくすること、②かご重量を極力軽くし電力設備容量の低減を図ること、などの建築設備側の要求に応える必要がある。その対応法として、かごの両側面にリニアモータの2次側を配置し、これに対向する昇降路側面に1次側を設置する方式を通常は思い浮べる。しかし、かごの両側面を使ってかごを昇降させる両側配置駆動方式は、リニアモータの強力な吸引力によりかごをひずませることが考えられ、これに耐え得るかご枠構造とすると、枠体が強固となり、かご重量が大幅に増加することが懸念された。したがって、今回はかご背面(ドアの反対側)にLSMの2次側、すなわち、永久磁石と磁路鉄板を

表 2 各種リニアモータ駆動方式の比較
(エレベータ仕様：速度 7m/s, 積載量 2,000 kg, 工程 200 m)

分類	方式	昇降体総重量	かごの発熱	かご電力供給方式	制御性	判定
LIM	昇降路1次	1.5	大(2次導体)	蓄電池(夜間充電)	複雑	×(発熱)
	かご1次(INV搭載)	∞	かごにインバータを搭載すると、その重量がプラスされ、かごは上昇できなくなる。			×
	かご1次(INV地上)	7	大(LM)	集電子&トロリ線	複雑	×(重量)
永久磁石式LSM	昇降路1次	1.5	小	蓄電池(夜間充電)	複雑	○
	かご1次(INV搭載)	2.5	中	集電子&トロリ線	普通	△
超電導磁石式LSM	昇降路1次	2	小	蓄電池(夜間充電)	複雑	×(信頼性)
	かご1次	超電導磁石を昇降路壁に敷き詰めることは実現性に乏しいので、検討を省略した。				×
現ロープ式エレベータ			極めて小	ケーブルコード	複雑かご不可	

- (注) 1. 昇降体の総重量は、現ロープ式エレベータを“1”とした時の相対値で示した。
 2. 制御性は、ここでは複数かごを同一昇降路内で運転する時の制御性を示した。
 3. INV:インバータ, LM:リニアモータ

配置する片側駆動方式で検討した。

リニアモータの所要推力はケージの総重量から以下のよう求められる。

$$W = W_c + W_L + W_s + W_b + W_e$$

ここで W_c :かご室, W_L :かご枠重量(約 2,000 kg), W_s :ペイロード重量:約 2,000 kg), W_b :リニアモータ 2 次側重量(約 1,000 kg), W_e :かご内電力用バッテリー重量(約 500 kg), W_e :制動装置重量 ($W_e = 0.3 w$)

さらに、かごを 0.1G で上昇加速させ、かつ、走行時の摩擦などの抗力を考慮してリニアモータの推力 F を 2 割増しにするとかご全重量は約 8t になる。したがって、リニアモータの所要推力 F は次式となる。

$$F = 1.2 \times 8,000 \times 9.8 = 95 \text{ kN}$$

LSM を設計するに際し、その据え付け誤差よりギャップ長を 10 mm とし、1 次鉄心積厚はエレベータかごの幅寸法より 600 mm として、表 3 に示すような具体的諸元を得た。

また、極ピッチを変化させたときの皮相電力、力率、効率を計算すると、この LSM では極ピッチ $\tau = 0.15 \text{ m}$ が最も適当であった。またリニアモータの 1 次コイルは、幅 1,000 mm (含コイルエンド)、長さ 2,400 mm となり、昇降路内全長に設置する。かごには永久磁石を取り付け、かごの駆動、制動を行うものとする。リニアモータの吸引力(本設計例では 25 kN 程度)対策として、従来からのかご

表 3 リニアモータ諸元表

機種	永久磁石式 LSM	2 次側重量	476 kg/かご
方式	地上 1 次・片側式	永久磁石重量	288 kg/かご
周波数	0~22.2 Hz	相電流	13.8 kA
極ピッチ	150 mm	機械出力	633 kW
極数	16 極	銅損	24 kW/m
ギャップ長	10 mm	相電圧*	39.0/72.9 V/T
1 次鉄心積厚	600 mm	皮相電力**	1,630/3,010 kVA
推力	95 kN	効率**	0.91/0.85
1 次鉄心重量*	631 kg/m	力率**	0.43/0.25

*1:配線不含

*2:給電セクション長を 1 階床/2 階床とした場合

レールのほかに、1 次コイルの両側にもレールを設け、この上にかご側の車輪を転動させ、ギャップを維持するようにした。そのほか、設置計画図上で従来のエレベータと異なるところの主なものとしては、かご下にレール挟圧式制動機を設けたことである。この機器の配置で昇降路の平面寸法は、幅 3,500 mm、奥行 2,960 mm となり、水平投影面積は従来形エレベータ対比で 30% 増に取まった。

ロープレスエレベータは 1 シャフトに複数のかごを走行させることから、鉄道システムと同様に安全性を考慮し閉塞システムを採用する。また、エネルギーの有効利用の観点から、かごの存在する 1 次コイルのみを励磁するように 1 次コイルの励磁切り替え装置を必要とする。

無停電時には 2 次側の永久磁石により、1 次巻線に電圧を発生させ発電ブレーキとしてゆるやかに降下するようなシステムを考えている。

4. 今後の研究課題と展望

ロープレスエレベータへのリニアドライブの実現に向けて、ビジョンは応用システムとの関係で明確にされるとして、これらの技術的な問題点がいかに解決されていくかの見通しを展望してみよう。これらの問題点を要約すれば、①リニアモータはロープレスエレベータを駆動するのに十分な特性・制御性をもつようにできるか、②安全・停止・乗り心地・信頼性が在来機と同じレベルで確保できるか、③エネルギー的に効率よく、建物環境に影響を与えないようにできるか、となる。

第 1 の点については、特性からはまだ十分に設計の最適化ができていない段階にない。今後エレベータの駆動に適した形態のリニアモータの 1 次・2 次の構造を見いだしていくことによっても、現状の範囲でも目的を満たすことは可能と考えられる。ここでの検討は、標準的な構成のモータの適用時の特性を論じているので、個別の応用ではさらに改善の余地がある。

この点を交通システム用リニアモータでの検討経緯と比

較すると、一般的なシステム評価のための概念設計段階と試作段階ではほぼ重量が半分になっている。システム、試作機から実用プロトタイプ機の間ではまた数10%に減少している。したがって、ここでの予備的な検討結果は必ずしも悲観的なものではない。上に述べた、構造のより詳細な検討に伴う電磁ギャップ長の最適化なども縮小化の余地がある。

特に永久磁石の特性向上は、永久磁石型 LSM の実用上の可能性を十分に発揮しつつある。永久磁石自体の最大エネルギー積も年々向上し、温度特性やさびの防止技術の向上などとあいまって、実用性の面でも期待できる。なかでも、Nd-Fe-B 磁石がめざましく、最大エネルギー積は近々45 MGOe 磁石の出現も可能と考えられている⁽⁶⁾。さらに電動機としての特性に有効である多極着磁や正弦波分布着磁の技術向上があり、単に推力向上のみならず、制御性の向上、非振動化に有効となる。

制御性能、特に停止時あるいは始動時の乗り心地を含めた詳細な性能については、今後の試作機による実験で明確にしていく以外に方法がないが、他分野での技術が応答性を高めるだけで導入できるし、センサ・制御プロセッサなどの進歩は早いので、実用時期までの解決は容易であろう。交通システムの制御と比較して速度が低いのでその分は有利である。次に述べるガイド性能とのかねあいで吸着力の制御を統合するなどの構成も必要になろう。

発生力・制御機能を併せて、本当にリニアモータによって垂直移動システムが実現できるかという疑問に対しては、すでに数年前ドイツの鉱山で実用規模で人車用のこう配30%で運転できる ITS (Industrial Transportation System) が AEG 社で開発され、試験されていたことを考えれば、しかもそれが鉱山の中での輸送システムに伴う事故を解決するものであったのであるから、その後の技術進歩を想定すれば技術的な可能性は十分にあるといつてよいであろう⁽⁷⁾。

第2の安全性などについての問題の多くは、試作装置による試験によらなければ評価が難しい。しかし、その多くがガイド・安全停止機構の構成にかかっている。ガイドについては、ロープレスエレベータが軌道交通機関と性格が近いので、従来のエレベータでの方式と区別して考える必要があるであろう。リニアモータからの荷重を受ける可能性や安全機構との一体化を考慮した新しい機構での解決が求められようし、微小重力試験用の落下塔での利用が進んでいる磁気ガイドの導入がそれを与える可能性が強い。

常時の走行中の停止のための信頼性の高いブレーキ・把握機構については、具体的な検討はここではなされていないが、速度領域ではほぼ同じであるケーブルカーにおい

て、ロープをつかんだり離したりして走行する POMI システムが実際に公共交通機関として国立交通安全研究所の評価の下でフランスのラオン市で使用されていることを考えれば特に解決が難しいとは思われない⁽⁸⁾。

第3のエネルギー・環境問題については多くの点が交通システムにおけるリニアモータカーと共通であり、そこでの技術進歩が解決を助けるだろう。特に、エレベータシステムでは多数のケーシングが同時に運転されるので、回生ブレーキエネルギーの回収は吸取装置を用いる必要が少なく有利であり、モータの発熱も建物全体としてのエネルギー回収機構の中に組み込める。磁気シールドについてもケーブルダクトなどからの発生分と総合的な対策ができる。

ガイドに依存して走行するロープレスシステムの特性を積極的に捕らえれば、騒音・振動などの建物環境への改善にも役立つ。水平方向への移動をも組み込んだシステムを想定すれば、隣接する建物間の移動に一人あたりが要するエネルギーシステムとしてみても、システム的に省エネや環境対策にも貢献できる。

5. おわりに

リニアモータの縦駆動の話題は、ほかにも宇宙空間への移動を目的としたカタパルトや大深度地下での放射性廃棄物貯蔵を目的とした駆動利用、長立坑における雪の発生過程の観察など多岐にわたっている。しかしながら、まだ概念設計のレベルにとどまっているものが多い⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

すなわち、リニアモータの縦駆動利用はようやく実現されだした状況にあり、リニアモータの機種や設定方法を含め、未検討の項目があまりにも多い。本稿では筆者らの独断による発想もしくは設定で論議を進めたが、これからの検討がさらに重要となろう。(平成7年4月10日受付)

文 献

- (1) 追跡:「阪神大震災(建築学会調査まとめ)」、日経アーキテクチュア、3-13 (平7)
- (2) 喜多村・斎藤・西井・佐藤・堀・森・宮澤・平:「ロープレスエレベータ構想」、平成5年電気学会全国大会シンポジウム、S12-4 (平5)
- (3) 正田・海老原:「構造物間連続型リニア技術協同研究委員会報告、電学論D、114、p.1184 (平6-11)」、
- (4) 中里・小豆澤・石井・大島・豊嶋:「ロープレスエレベータへのリニアモータ適用の検討」、平成5年電気学会全国大会シンポジウム、S12-5 (平5)
- (5) 正田英介編:「リニアドライブ技術とその応用、6.2節、オーム社 (平3)」、
- (6) 清水:「Nd-Fe-B系異方性希土磁石」、'93モータ技術シンポジウム、A3セッション、(社)日本電機協会 (平5)
- (7) AEG: Industrial Transportation System (ITS) 資料
- (8) RTS (Revue de LIM INRETS): *Transports Guides Urbains*, No. 13 (1987)
- (9) 渡辺英紀、他:「昇降機技術の展望」、三菱電機技報、64、10、p.794~795 (平2)
- (10) T. Ishii: "Elevators for Skyscrapers". *IEEE SPECTRUM*, p. 42~46, Sept. (1994)

S.12-4 ロープレスエレベータ構想

喜多村 義矩 斎藤 満 酒井 佳人 ○佐藤 秀雄 堀 大成 森 正人 宮沢 敬治
 (鹿島建設) (大林組) (大成建設) (竹中工務店) (大林組) (大成建設) (東京電力)

1. はじめに

第3次産業の発達に伴い生産性の向上を目的とした業務の集約化が起り、結果として業務地域が形成された。

通信手段の発達には業務活動の集中化をさほど必要とはしないと考えられ、事務所が郊外へ分散する動きが見られたが、業務慣習と通信手段の整合性が満足されず、むしろ業務地域の再開発や高層化・大規模化を可能とする建築技術の進歩と交通機関の拡充およびそれらを支える法制度の緩和により、新しい稠密化した業務地域の発生が見られるようになった。

再開発および新業務地区形成においては制約のある土地の有効利用のため、超高層化と地下利用を必ず伴うことになるが、超高層化・大深度化による構造躯体コストおよび施工コストの増加と建物の有効面積率の低下などによって投資効率が下がることを克服して行くことが建設業にとって大きな課題となっている。

建物の超高層化さらに超々高層化あるいは大深度地下利用について建設請負業者(ゼネコン)各社および官民共同研究により積極的な提案がなされているが、その中において縦方向輸送の方法論的かつ技術的解決が重要な問題となっている。

以下、将来の建設構想の概要を紹介し、次に建設業から見た将来型エレベータ(EV)の必要性と構想および開発課題について報告する。

2. 21世紀の建設構想

2.1 超々高層都市構想

1980年代後半の地下高騰と都市環境の醜悪化から土地の効率的利用と稠密都市における環境・機能回復などの問題を提起する目的で、高度化しつつある建設技術や関連技術および資本蓄積を背景に、図1に例示する超々高層都市や図2の大深度地下利用都市などの都市レベルの構想が発表された。

その後、景気のかげりが見え始め膨大な投資を要する構想は妄想化の嫌いを否めなくなった感があるが、図3に見るように4%の経済成長率を持続すれば、大きなトレンドとして2000年には数年前の建築需要に回復する見通しもあり、さらに図4のように地価が反発を繰り返すことが予想され、提起された問題は消え去ったとは言えない。

今では21世紀の都市の課題を建築レベルで考え、現在の技術・経済的水準で十分解決の見通しのある現実的な企画がなされている。

2.2 超々高層建物構想の概要

図5に各社の企画案を示す。建物用途は3案が複合施設、

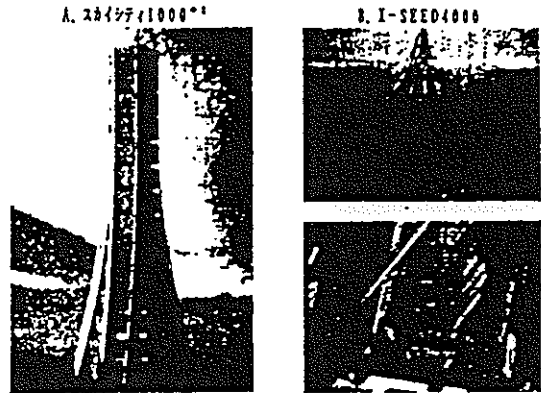


図1 超々高層都市構想

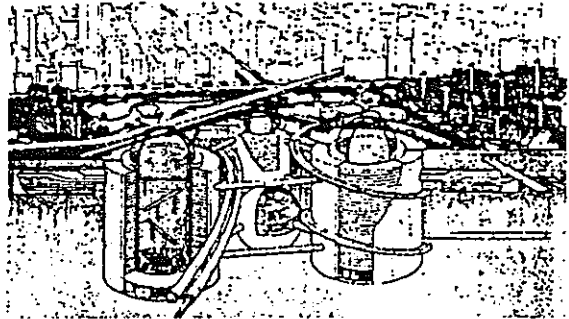


図2 大深度地下利用都市構想

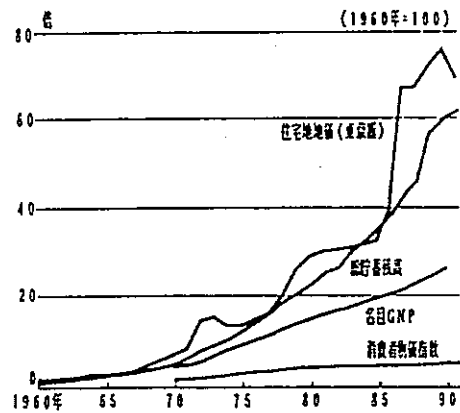


図3 事務所建物着工量実績と予測(東京圏)**

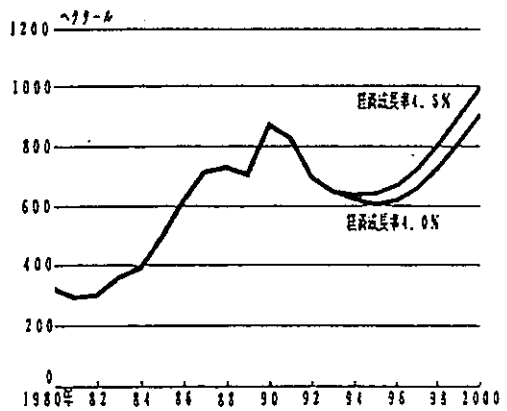


図4 地価の動き**

2案がオフィス専用、高さは約500mから800m、地上階数は100階から200階、延べ面積は35万m²から150万m²と様々であるが、構造・環境設備・施工計画を具体化に行っている。EV計画は海外で実績があり、超高層建物の面積有効率が向上できる方法であるスカイロビー・シャトル・EV方式をとっている。なお、第1案は近い将来に実現する期待を込めて、リニアモータを駆動方式とした革新的なEVシステムを考慮している。

名称	リニアタワー	DIB-200	ステップオーバータワー	TAK600	TAISEI2000
用途・収容力	1714(L.125A) E2(11.125A)	オフィス ホテル 住宅	オフィス (8万人)	オフィス (2.5万人)	オフィス 住宅
高さ	800m	800m	800m	600m	480m
階数	150F B14F	200F B7F	160F	106F B3F	100F B6F
延べ床面積	96.3万m ²	約150万m ²	132万m ²	60万m ²	35万m ²
エレベータ	1714(L.125A) E2(11.125A)	1714(L.125A) E2(11.125A)	シャトルエレベータ	1714(L.125A) E2(11.125A)	エレベータ&エスカレータ

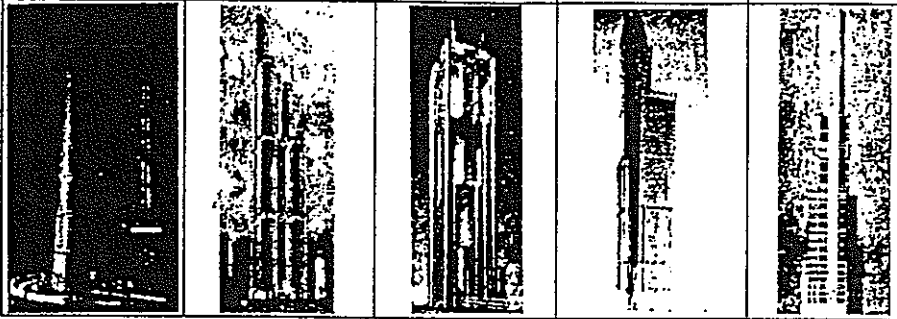


図5 超々高層建物構想**

3. ロープレスエレベータの必要性

建物が高層化するにつれてEVの必要性が増加する。超高層建物においてはさらに重要度が増し、EV計画を中心にして建物の設計が行われることになる。超々高層建物の企画において、EVに関して主に、①ロープ式EVの揚程に問題はないか、②建物の面積有効率はどのようになるか、③サービス時間や輸送力に問題はないか、など3項目の検討が必要となる。以下、超々高層建物を前提としてこれらの点について述べる。

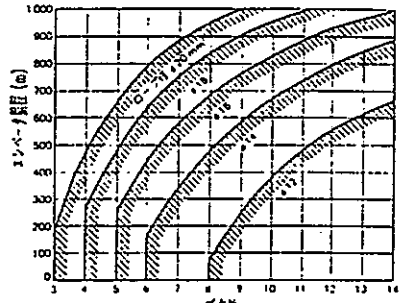


図6 エレベータの揚程限界**

3.1 エレベータの揚程限界

ロープ式EVの各部構造や安全率の採り方については建築基準法で規定されている。図6はロープ径毎に、本数と揚程の限界の関係を見たものである。ロープ径と本数を増やせば揚程に限界はないようであるが、現実的には800mが限界と言われている。2.2節に紹介した超々高層建物の高さはこの値以下に設定され計画されたようであるが、2.1節に述べたような1000mを超える場合で、地表から最上階に一気に昇降する時にはロープ式では全く不可能となる。

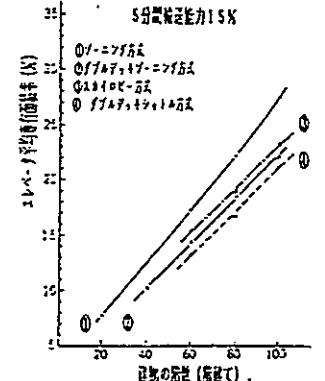


図7 エレベータ専有面積率**

3.2 エレベータと建物面積有効率

建物面積有効率とは延べ床面積に占める主建物用途に供用できる面積の割合を言い、EV専有面積率とは延べ床面積に占める昇降路、乗降ホールおよびEV機械室面積の割合を言う。面積有効率とEV専有面積率の合計は100%とはならず、共通廊下、トイレおよび諸機械室などの面積の延べ床面積に対する割合(7~9%)が残ることになる。

図7は基準階面積を2,000m²前後とし、出動時ピークを対象とした4運行方式毎に関するEV平均専有面積率を示す。同図から、建物階数が増加するにつれて専有面積率も直線的に増加することが分る。40階建ての通常の超高層建物と100階建てを較べると、運行方式により差はあるが、面積専有率が12~16%増加することを示している。したがって、面積有効率は同値だけ低下することになる。表1は建物高さ別、運行方式別に平均面積専有率と低層部のそれを見たものである。同表中、A・B列は方式①を基準として各運行方式を比較し、C列は低層部での専有面積率が建物平均のその1.5倍になるものとして、B列を同倍したものである。同表によると、低層部は最も良い運行方式でも上述の専有面積率が20%以上増

表1 エレベータ運行方式と面積専有率**

建物階数	A. 全体平均		B. 低層部		C. 低層部	
	40階	111階	40	100	40	100
ゾーニング方式	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50
1714(L.125A) E2(11.125A)方式	0.14	0.14	0.15	0.15	0.23	0.23
スカイロビー方式	0.10	0.11	0.11	0.11	0.17	0.17
1714(L.125A) E2(11.125A)方式	0.11	0.11	0.11	0.11	0.17	0.17

表2 ロープレエレベータの検討課題

検討対象	検討項目	検討内容
1. 駆動システム	1)昇降用リニアモータ 2)制動機構	①ロープレEV実現に必要なリニアモータの形式と諸元の検討 ②制御システムと運動したき電区間・給電区間の検討と給電区間渡りの検討 ③機械的制動機構とリニアモータによる回生制動の可能性の検討
2. 運行制御システム	1)センサ類および情報通信システム 2)運行制御システム	①各EVカゴの行先・位置・速度・加速度・方向・荷重・故障情報などの検出と昇降路内情報通信システムの検討 ②EVカゴ自律制御と統括的制御システムおよび最適運行計画の検討
3. 安全システム	1)非常時安全システム 2)電磁波・磁気影響評価	①速度センサと運動した緊急停止装置と救出方法の検討 ②緊急時大容量蓄電システムの検討 ③移動発生源による生体および電子機器への影響度の評価と遮蔽方法の検討
4. 電力供給	1)ラッシュ時ピーク電力 2)給電方法	①EV駆動電力の算定 ②ピークシェイピング用蓄電装置・回生電力有効利用・EVカゴ軽量化・電力低減のための最適運行方式の検討 ③運行と運動した多数の一次コイルへの給電方法の検討 ④カゴ内照明・ドア開閉・各種センサへの電力供給方法の検討
5. 昇降路	1)EVカゴ・昇降路の機構	①片側式リニアモータの吸引力に対するカゴ構造形式と機械的強度の検討 ②横行転舵方式の確立と諸強度および耐久性の検討 ③振動・騒音・耳痛など乗り心地の評価と対策の検討 ④消費電力低減のための構造形式・使用材料の検討によるEVカゴ軽量化
6. 建築計画	1)建築計画への影響	①ロープレEVを想定した建築計画上の問題点の洗い出し
7. 経済性	1)建物事業収支	①ロープレEV導入による費用増分と面積有効化による収入増分の検討

アモータで駆動し、図10はEVの両サイドに設けた両側式リニアモータで駆動するものである。横行機構に関しては、図9では横行用レールを設け、昇降用レールとの接点を回転させ横行を行おうとし、図10では上端で吊り下げ機でEVを横行床に移動しEVを自走横行させ、下端では緩衝機を兼用した油圧装置でEVを受け下げて横行床を自走横行させ、その後油圧装置でリニアモータ部まで押上げる方式を採っている。また、図10ではEVの上下に随時相互の緩衝と接続を行えるように超電導磁石を発想している。

以上、ロープレEV構想のイメージについて述べたが、この実行可能性を把握するには多くの課題を抱えている。次章に今後検討すべき課題について述べる。

4. ロープレエレベータ構想の課題

表2に今後の検討課題を示す。いずれも重要な課題と思われるが、中でもBの運行制御に関わる項目であるが、循環運行によって果たして従来以上のサービス性が得られるかどうか、またDの電力問題では将来のエネルギー供給から見て電力の消費量は妥当であるかどうかなどがロープレエレベータ構想が成立するポイントになるものと推察する。

5. おわりに

超々高層建物は近い将来実現の可能性があること、超々高層建物の実現にはエレベータシステムが大きな鍵を握っていること、近い将来のエレベータシステムとしてロープ式を超えるものを開発する必要のあることについて述べた。また、建設業からロープレエレベータに関する1、2のアイデアと課題を述べた。電気学会、電気業界ならびに建設業界がこのロープレエレベータの実現に向けて協力して研究を続けられたら幸いである。

最後に、今回の報告に当り御指導を賜りました縦型リニアドライブ研究委員会の正田委員長、幹事役員の方々、ならびに電気業界の委員の方々に本紙を借りて厚くお礼を申し上げます。

<参考文献・資料> *1)グループ1000「縦型都市鉄道」新文堂出版 1979. *2)木島則「地面口及び上昇する」日経ビジネス 1992年11月2日号. *3)「超々高層への挑戦」GA No. 69 1993. *4)日本建築学会編「建築資料集10」丸善 1983. *5)新保池「超々高層ビルにおけるエレベータシステム」三菱電機技報 Y 61. 46 No. 12 1972. *6)「空中都市」非刊大誌 No. 30 1989

S.12-5 ロープレスエレベータへのリニアモータ適用の検討

中里 眞朗 小豆澤 照男 石井 敏昭 大島 健二 豊嶋 順彦
 (日立製作所) (東芝 研究開発センター) (三菱電機) (日本オーテスエレベータ) (東芝 府中工場)

1. はじめに

近年、大手建設会社より、高さ1,000mを超える超々高層ビル構想や、大深度地下利用構想が発表され、縦方向の人及び物の輸送はどうあるべきか盛んに議論されている。

従来より超高層ビルの縦の輸送には、釣瓶式のロープ式エレベータが使われてきた。ロープ式エレベータは、昇降行程が大きくなると、総懸垂荷重に占めるロープ重量の比率が高くなり、ロープ破断強度の10倍以上の安全率を定めた法規を満足させるとなると、現行構造及び材料のロープを使用する限りでは、行程700~800m程度が実用的な限界となる。また、ロープ式エレベータは、通常、1つの昇降路に1台のかごしか運行できないので、エレベータの待ち時間を現状並みに抑えようとすると、ビルの階床に準じてエレベータの設置台数を増やす必要が有る。従って、サービス階床の増える超々高層ビルでは、エレベータコア面積のビル全体の水平投影床面積に占める割合は、50%を超えることも予測され、非常に不経済な建物となる。

以上の現行ロープ式エレベータの限界を打破するものとして、リニアモータ駆動によるロープレスエレベータへの期待が高まってきた。本稿では、エレベータのかごをリニアモータで駆動するとしたときの各種方式の概略的な検討と、その中で現在最も実用化の可能性の有る駆動方式での具体的検討例、安全装置および今後の開発課題等を報告する。

2. ロープレスエレベータ駆動用モータの必要推力

2.1 エレベータ仕様

本稿で検討するロープレスエレベータの仕様として、現行のロープ式エレベータと諸元を対比する意味で、次のように設定した。

速度：7m/s, 積載量：2,000kg(30人), 行程：200m

2.2 駆動用リニアモータの必要推力

2.1節のエレベータのかごを上昇、下降させるリニアモータ駆動方式として、図1に示すように、リニアモータの一次コイルを昇降路に設置する“昇降路一次式”、一次コイルをかごに搭載する“かご一次式”がある。これらの方式では昇降体の総重量が異なるため、リニアモータの必要推力も自ずと異なる。

(1) 昇降路一次式

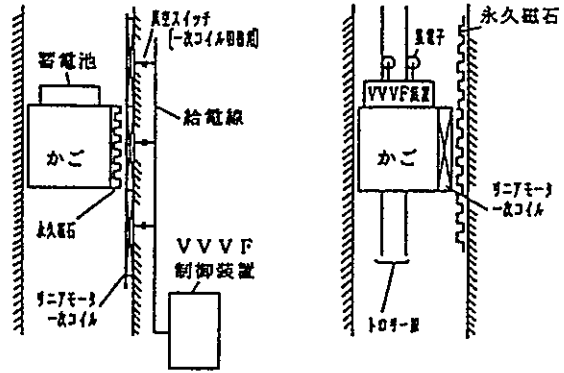
リニアモータ一次コイルが地上に有るため、昇降体の総重量 W_n は(1)式ようになる。

$$W_n = W_c + W_L + W_m + W_{inv} + W_s \dots (1)$$

ここに、

W_c : かご室・かご枠重量(約2,000kg)

W_L : ベイロード重量 (2,000kg)



(1) 昇降路一次式 (2) かご一次式

図1. リニアモータによるエレベータかご駆動方式 (永久磁石式リニア同期モータによる例)

W_m : リニアモータ二次側重量

W_{inv} : かごに搭載蓄電池重量(1825kWhと想定, 約500kg)

W_s : 非常止め、制動機重量(総重量 W_n に比し、0.3 W_n と想定)

リニアモータの推力 F_n は、この昇降体を重力に逆らって、0.1G(0.98m/s²)で上昇加速する必要があり、更に、摩擦力等の走行抗力に対する補償も勘案すると、

$$F_n = 1.2 \times W_n \dots (2)$$

以上とする必要がある。(静推力、動推力とも)

(2) かご一次式

リニアモータ一次コイルはかごに搭載されるため、それを駆動するVVVFインバータ制御装置もかごに搭載するのが良く、昇降体総重量 W_{nc} は(3)式ようになる。

$$W_{nc} = W_c + W_L + W_m + W_{inv} + W_s \dots (3)$$

ここに、 W_c, W_L は(1)式と同じで説明省略、

W_m : リニアモータ一次側重量

W_{inv} : インバータ制御装置重量

W_s : 非常止め、制動機重量(総重量 W_{nc} に比し、0.3 W_{nc} と想定)

この場合のリニアモータの所要推力 F_{nc} は、同じように、

$$F_{nc} = 1.2 \times W_{nc} \dots (4)$$

以上となる。

3. 各種リニアモータ駆動方式の比較検討

数トンの重さのエレベータかごを上下に駆動させるに適したリニアモータとして、リニア誘導モータ(以下、LIMと略称)及びリニア同期モータ(以下、LSMと略称)がある。またLSMでも、界磁に永久磁石を使用したものと超電導磁石を使用したものとが考えられる。

まず、これらのリニアモータによる各種駆動方式の定量的比較を行い、現時点での実用化に適した方式を選定することとしたい。

リニアモータの分類として、LIM, 永久磁石式LSM,

表 1. 各種リニアモータ駆動方式の比較 (エレベータ仕様; ①速度7m/s, ②積載量2000kg, ③行程200m)

分類	方式	昇降速度	効率/力率	上昇時電力/上昇時電流	大の発熱	大の騒音	安全装置の規模	制御性	判定	
L I M	昇降路一次	1.5	0.4/0.3	1,700kW/5,700kVA	大(2階)	蓄電池(騒音)	現状レベル+α	複雑	×(発熱)	
	かご一次(インバータ)	∞		かごにインバータを搭載すると、その重量がプラスされ、かごは上昇出来なくなる。					×	
	かご一次(インバータ)	7	0.6/0.3	5,300kW/18,000kVA	大(7モータ)	騒音(騒音)	超強大なもの	複雑	×(重量)	
永久磁石式	昇降路一次	1.5	0.8/0.9	800kW/890kVA	小	蓄電池(騒音)	現状レベル+α	複雑	○	
L S M	かご一次(インバータ)	2.5	0.9/0.9	1,300kW/1,500kW	中	騒音(騒音)	強大なもの	普通	△	
超電導磁石式	昇降路一次	2	0.8/0.9	1,100kW/1,200kVA	小	蓄電池(騒音)	強大なもの	複雑	×(信頼性)	
L S M	かご一次	超電導磁石を昇降路壁に敷き結めることは実現性に乏しいので、検討を省略した。								×
現ロープ式エレベータ		1	0.95/0.8	80kW/100kVA	極めて小	ケーブルコード	-	騒音(騒音)	-	

(注1) 昇降体の総重量は、現ロープ式エレベータを“1”としたときの相対値で示した。

(注2) 制御性は、ここでは複数かごを同一昇降路内で運転するときの制御性を示した。

超電導磁石式LSMの三つに分け、それぞれの昇降路一次式、かご一次式について、昇降体の総重量、モータの効率/力率、定格速度・定格積載量上昇時の有効電力/皮相電力、かご部での発熱など実用化を図る上で検討すべき評価項目を、現状のロープ式エレベータと比較した。(尚、超電導磁石式LSMのかご一次駆動方式は実現性が殆ど無いため、検討を省略した。また、LIMかご一次式は、インバータ制御装置を搭載すると推力が不足し上昇できないので、インバータ制御装置を地上に置いたもので検討した。)

概略計算に当って、エレベータ仕様、かご重量等の諸数値は2.2節に示した数値を使用し、2.2節に示されていない数値については次のように仮定した。

- ① W_m (リニアモータ重量) = 所要推力 $F \times 1/2$ (LIMの場合)
= 所要推力 $F \times 1/3$ (LSMの場合)
- ② W_c (リニアモータ重量) = 1,000kg (LIM, LSM 共)
- ③ W_{inv} (インバータ重量) = 1kg/kVA

結果は表1に示すように、永久磁石式LSM昇降路一次式が良い。LIM昇降路一次式の場合にはかごに取り付けられる二次導体の発熱が大きく、乗客輸送の面で好ましくない。また、超電導磁石式LSMの場合には、超電導磁石を重力に逆らって昇降させるに耐える信頼性が未だ確立されていないことから、具体的検討の候補に入れなかった。

4. 昇降路一次・LSM駆動方式による具体的検討例

エレベータ仕様として、2章に示した仕様のもので、昇降路一次・LSM駆動ロープレスエレベータの具体的検討を行った。

リニアモータの配置の検討に当っては、①昇降路の水平投影面積を極力小さくすること、②かご重量を極力軽くし、電力設備容量の低減を図ること、などの建築設備側の要求に応える必要が有るが、かごの両側面にリニアモータを配置し、かごの両側面を使ってかごを昇降させる両側式駆動方式は、リニアモータの強力な吸引力によりかごを歪ませることが考えられ、これに耐え得るかご枠構造とすると、枠体が強固となり、かご重量が大幅に増加することが懸念された。

従って、今回は、かご背面(ドアの反対側)にLSMの二次側、即ち、永久磁石と磁路鉄板を配置する片側式駆動方式で検討した。

4.1 リニアモータ所要推力の検討

リニアモータの所要推力の一般式は2.2節で述べられており、(2)式を使って推力を求める。

昇降体の重量は、

- ①かご室、かご枠重量 (W_c) : 2,000kg
- ②ペイロード (W_l) : 2,000kg
- ③蓄電池重量 (W_b) : 500kg
- ④非常止め、制動機重量 (W_s) : 2,500kg
- ⑤永久磁石、磁路鉄板等 (W_m) : 1,000kg
(永久磁石はネオジウム-鉄-ホウ素系磁石を使用)
- ⑥合計 : 8,000kg

となる。

従って、リニアモータ所要推力 F は、

$$F \geq 1.2 \times 8,000 \text{ (kg)} \times 9.8 \text{ (m/s}^2) \approx 95 \text{ kN}$$

即ち、95kN以上となる。

4.2 リニアモータの諸元

4.1節の結果から、ロープレスエレベータ用LSMの具体的検討を行った。エレベータの据付誤差よりギャップ長を10mmにとり、また、エレベータのかごの幅寸法より一次鉄心積厚を600mmとし、具体的設計を行った。結果は表2に示す通りである。

表2. リニアモータ諸元表

機 種	永久磁石式LSM
方 式	地上一次・片側式
周 波 数	0~22.2 Hz
極 ピ ッ チ	150 mm
極 数	16 極
ギャップ長	10 mm
一次鉄心積厚	600 mm
推 力	95 kN
一次鉄心重量*1	631 kg/m
二次側重量	476 kg/カゴ
永久磁石重量	288 kg/カゴ
相 電 流	13.8 kAT
機 械 出 力	633 kW
銅 損	24 kW/m
相 電 圧*2	68.4 V/T
皮 相 電 力*2	1,630 kVA
効 率*2	0.91
力 率*2	0.43

*1: 配線不含

*2: 給電セクション長を2階床とした場合

4. 3 エレベータ設置計画の検討

4. 2 節の L S M を使用したエレベータ設置計画例を、図 2 に示す。リニアモーター一次コイルは、コイルエンドを含めて幅 1,000mm、長さ 2,400mm であり、これを昇降路内に上下に敷き詰める。これに対向してかご側に永久磁石を取付け、かごを昇降させるための駆動、制動力を発生させる。リニアモーターの吸引力(本設計例では 25kN 程度)対策として、従来からのかごレールの他に、一次コイルの両側にもレールを設け、この上にかご側の車輪を転動させ、ギャップを維持するようにした。その他、設置計画図上で従来のエレベータと異なるところの主なものとしては、かご下にレール挟圧式制動機を、また、昇降路内に無用な一次コイルの励磁を避けるための一次コイル切替装置を設けたことである。この機器の配置で昇降路の平面寸法は、幅 3,500mm、奥行 2,960mm となり、水平投影面積は、従来対比で 30% 増に収まった。尚、その他の諸元については表 3 に示した。(従来型エレベータとの対比で)

表 3. ロープレシリニアエレベータの具体的検討例
(エレベータ: 速度 7m/s, 積載量 2,000kg (30人), 行程 200m)

項目	ロープレシリニアエレ	現行ロープ式エレ
駆動モーター	永久磁石式 L S M	三相誘導電動機
駆動方式	昇降路一次、片側式	鈎合懸付き鈎板式
速度制御方式	V V V F インバータ	同左
かごサイズ (mm)	W2500×L2400×H5800	W2500×L2000×H5000
かご自重 (kg)	6,000	4,500
昇降路内法 (mm)	W3500×L3000	W3000×L2650
モーターサイズ (mm)	W1000×D200×L2400	-
モーター電圧供給方式	巻線セクション巻線式	-
最大上昇用電力 (kW)	750	80
回生電力 (kW)	最大 470kW, 2350kW	最大 45kW
電源容量 (kVA)	1,630	124
トコ励磁電力供給方式	集電子磁石電池	テールコード
かご内通信方式	L C X 漏洩同軸	テールコード
常用ブレーキ	レール挟圧式ブレーキ	ドラムブレーキ
非常ブレーキ	非常止め装置	同左
駆動許容寸法 (mm)	±10 (許す 710mm)	±5

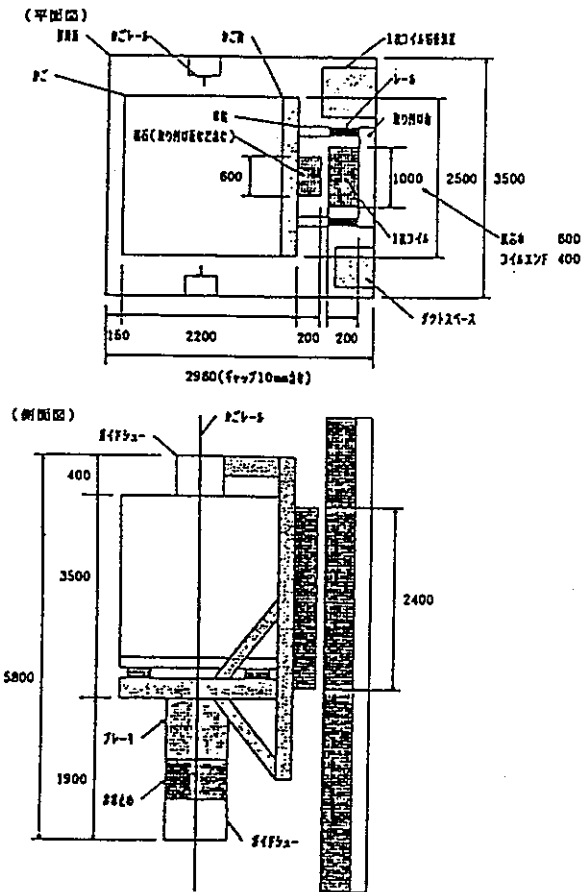


図 2. 昇降路一次 L S M による設置計画例

4. 4 制御システムの概要

昇降路一次 L S M 駆動方式で複数かごの運転制御を行う制御システムの概要を図 3 に示す。複数のかごが同一の昇降路内を走行するため、追突の恐れがあり、これを防止するため、鉄道と同じように閉塞システム (1 閉塞区間には 1 台のかごしか入れない方式) を採用している。それぞれ

の閉塞区間にはそれぞれインバータ制御装置を配置し、一次コイル切替装置 (ex. 真空スイッチ) を介して L S M の一次コイルを励磁する。隣接のインバータ制御装置は、閉塞区間を跨るかごの走行を円滑に行うため、相互に連繫を取る必要があるが、これは全てのインバータ制御装置を統括制御するエレベータ総合運転管理装置が司り、瞬時瞬時にそれぞれのインバータ制御装置に運転速度指令を送るようになる。

L S M 制御の場合、かご位置 (磁石の位置) を瞬時瞬時に正確に把握し、インバータ制御装置に帰還する必要があるが、昇降路内に交叉誘導線等の位置検出装置を設け、これに対処している。

かごとの信号の送受は、エレベータ総合運転管理装置が一括行い、乗場の呼び発生状況等も考慮に入れて、かご群を有機的に制御する。

電力制御については、先に示したように、かご上昇時に現状エレベータより 1 桁多い電力を消費するが、下降時には電力の回生が期待できるので、インバータ制御装置の直流部を相互に接続して電力を融通しあい、更に余った電力は蓄電池等の電力貯蔵装置に蓄電することにより、購入電力量を低減することが期待できる。

5. 安全装置の検討

ロープレエレベータの減速、停止を司る安全装置は、重い昇降体の全重量を支えるため、非常に大仕掛けのものとなる。更に、走行中にリニアモーターの推進力が喪失した時などの非常時には、かごは重力の加速度で自由落下するので、それをいち早く検出し、乗客の安全を考慮し、ソフトに且つ 100% の確度で減速停止させる必要があり、ロープレエレベータ実現のキーテクノロジーである。

今回の検討では、かごの昇降に従来通りガイドレールを

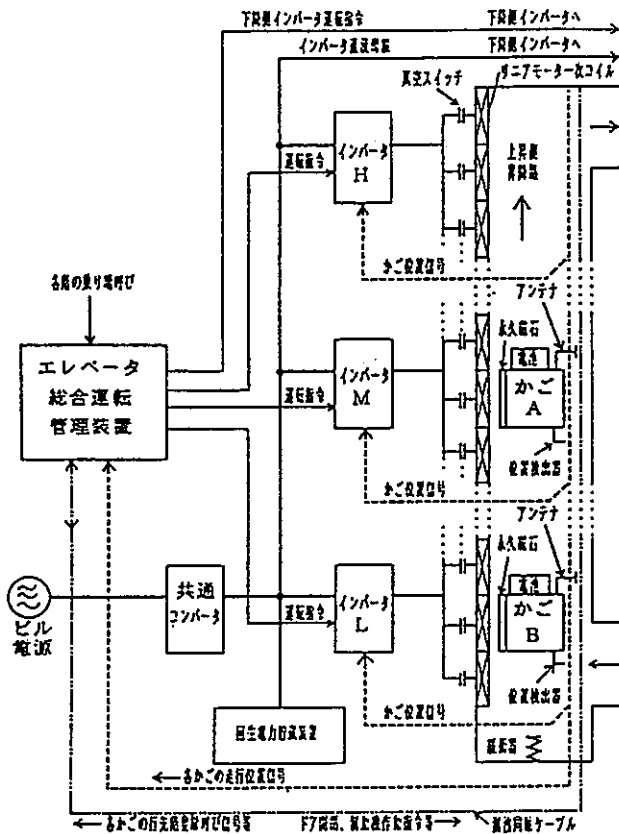


図3. 昇降路一次LSMによる駆動制御システム

使用するため、これを活用した安全装置とした。表4にその検討例を示す。レール挟圧式制動機は、かご走行時には電磁力又は油圧等でバネを圧縮、開放し、停止時には電磁力を開放、バネを作動させ、レールを挟み、かごを停止させるものである。非常止め装置は、従来のもと同じ原理のものであり、調速機式又はフリーラン検出装置により非常止め装置の楔を作動させ、かごの下降により自動的に楔をレールに食い込ませ、緊急停止させるものである。

機械式の停止装置の他、ソフトな減速をさせるものとして、電氣的制動装置（発電ブレーキ）の設置も有効であるが、方式の検討は今後の課題としたい。

表4. ロープレスエレベータの安全装置

用途	機能	方式・装置
常用	減速	インバータによる回生制動
	停止・保持	レール挟圧式制動機
	緊急停止(非常停止)	同上
非常用	速度異常増速	・発電ブレーキ ・レール挟圧式制動機 ・非常止め装置(緊急停止時)
	自由落下時	非常止め装置
	衝突追突防止	緩衝器、接近センサ、閉塞システム

6. 今後の開発課題

以上述べた中にも、今後の開発課題とすべき内容が含ま

表5. ロープレスリニアエレベータの開発課題

分類	項目	内容
技術	安全装置	乗客の安全第一の減速・停止システム
	推力脈動の低減	かご内振動は0.1m/s ² 以下
	吸引力対策	支持機構、車輪騒音
	磁石	高保磁力大型磁石の製作
	電力切替装置	1次側コイルへの給電切替制御と装置
	位置検出器	磁石位置検出/かご絶対位置検出
	かご給電方法	小型軽量蓄電池/トロリー方式
	かご軽量化	軽量化による所要推力・電力の低減
	通信方法	かご内と制御室との通信方法
	回生電力再利用	回生電力の蓄積と上昇時再利用方式
据付	永久磁石の積層・消磁	現地での岩磁・消磁方法、装置
	磁界対策	据付、保守時の防護、強磁界対策
運用	電波障害	1次コイル制御による電波障害対策
	所要電力	ロープレス750kW, ロープ式80kW

れているが、ここではそれらも含めて、今後、リニアロープレスエレベータを実用化する上での開発課題を纏めてみた。結果を表5に示す。

技術的には安全装置の開発が第一と考えるが、大型磁石の開発、電力切替装置、回生電力再利用方式等も大きなテーマである。運用面では大きな電力消費をどう賄うかが前記の回生電力再利用と併せて真剣に考えなければならない。

尚、1昇降路複数かごの垂直水平移動機構に関する技術課題も有るが、ここでは省略した。(その他、実用化を図る上では設備のコストの問題があるが、今回はとても算定できないのでご容赦願いたい。)

7. おわりに

永久磁石式リニア同期モータを使用したロープレスエレベータの具体例を主に、ロープレス新垂直輸送システムにリニアモータを適用したときの概略的な物理量の算定と技術課題を抽出した。

超々高層都市計画により限られた地球の居住面積を打破しようとする夢が検討されている昨今、ロープの限界を打破する新しい垂直駆動方式として、リニアモータは最も魅力に富んだ駆動方式である。永久磁石の性能もここきて飛躍的に増加し、機器の小型化、コストの低減が更に図られてゆくものと思われる。また、電力貯蔵システム、超電導技術の研究も着実に進められており、ロープレスエレベータの実現にも大きく寄与するものと思われる。

最後に、今回の技術検討を行うに当たっては、縦型リニアドライブ協同研究委員会の正田委員長他幹事役員の方々、大手建設会社の委員の方々などに御指導を受けた。本紙を借りて厚く御礼を申し上げます。

＜参考文献＞

- (1) 正田英介編:「リニアドライブ技術とその応用」オーム社
- (2) (株)日本エレベータ協会発行:「昇降機の技術基準の解説」
- (3) 日本工業規格 G3525 「ワイヤロープ」
- (4) 山田,他:「リニアモータ応用ハンドブック」工業調査会

か 超超高層都市における移送手段

【研究室から】

Direct Driveエレベーター

森正人

—大阪建設技術開発部宇宙開発室課長—

はじめに

超超高層都市の出現は、今までにない巨大な人工空間、特に高さ方向に我々が経験したことのない都市空間を提供する。このような空間内で人間が活動を行うためには、人員や物資の移送は不可欠であり、空間の規模に応じた効率的な移送システムが必要となる。移送システムが、空間の有効利用に影響を及ぼすことは言うまでもないが、逆に計画当初考えられる移送システムが、巨大空間の規模と利用計画を左右することになる。しかるに、超超高層都市の計画は、移送システム抜きで考えることはできない。

空間内の移送システムは、その空間の規模や利用目的に応じて最適なシステムが決定されるのであるが、将来、出現するであろう超超高層都市では、少なくとも大揚程の鉛直移動、斜め移動、水平移動等が必要になると思われる。

DD (Direct Drive) エレベーターは、これらの移動機能を持った、新しい都市空間のための新しい輸送システムとして提案されたものである。

DDエレベーター提案の背景

DDエレベーターは、超超高層都市構想に併せて提案されたシステムであるが、そのほかにも以下に示す背景がある。

- 近年、提案されてきた大深度地下空間の開発構想でも、効率的な移送システムの出現が望まれている。
- 現在、高層ビル街において隣接するビルへの移送手段は開発されていないが、搬器に乗ったままで到達できる移送システムの潜在的需要は極めて高い。
- 現在の超高層ビルでは、床面積に占めるエレベーターシャフトの面積が大きくビルの有効利用が妨げられており、占有面積が少なくして移送能力が大きいシステムの登

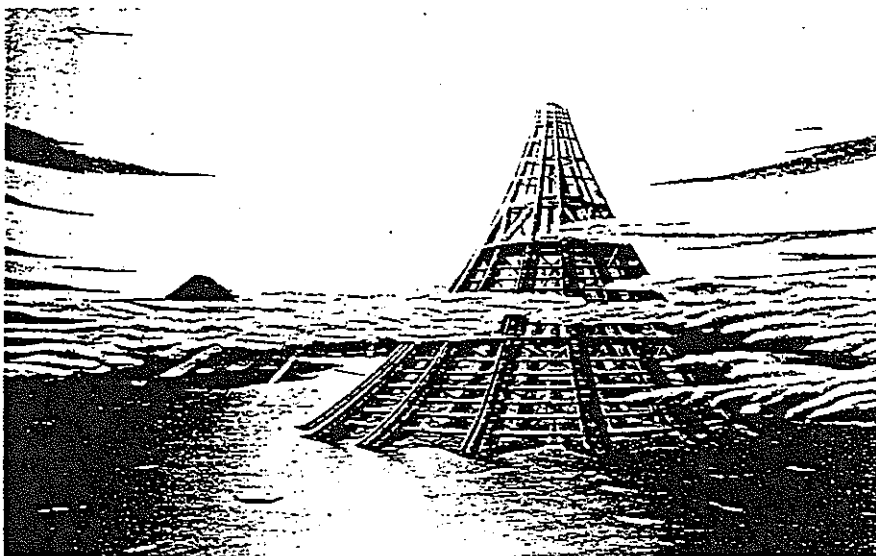


図1 超超高層都市「X-SEED4000」構想

表 DDエレベーターへの超電導コイルの適用

リニアモーターの種類	超電導コイルの種類	適用
超電導リニア開閉モーター (SLSM)	超電導コイル (非超電導)	一次コイル
超電導リニア開閉モーター (SLTM)	超電導コイル (一次コイル)	二次コイル

場が望まれている。

- 最近のリニアモーターの研究は、本構想を夢の世界から現実の世界へと移しつつある。

DDエレベーター構想

DDエレベーターとは：ワイヤーロープを用いず、リニアモーターによりエレベーターのかごを直接駆動するエレベーターである。

従来方式の問題点：従来のロープ式エレベーターは、ロープを介してかごと反対側にカウンターウェイトを取り付ける方式のため、次のような問題点があった。

- ロープ強度、安全率等の点から揚程に限界があった (約800mが限界と言われている)。
- 直線移動しかできない。
- 1本のエレベーターシャフトに1台のかごしか投入できず、面積効率が悪く、また輸送力アップに限界が生ずる。

DDエレベーターの特徴：DDエレベーターは、エレベーターのかごに取り付けられたリニアモーター移動部と、エレベーターシャフトに取り付けられたリニアモーター固定部との間に働く推力によりかごが駆動されるため、エレベーターシャフトが続く限り、どこまででも移動することができ、従来のロープ式の問題点を解決するのみならず、多くの特徴を有する。

- 揚程に限界がない。このため、どんなに高いビルにも適用することができ、利用者は乗継ぎなしに目的階に到達することができる。
- 水平・鉛直・斜めあるいは曲面の三次元移動が可能である。巨大空間内の効率的な移送が可能になるばかりか、ビル間移送システムの可能性が拓ける。
- 交差路または待避路を設けることにより、1本のエレベーターシャフトに複数のかごを投入し、各々を独立して運転することができる。これにより移送能力が増大し、シャフト数を少なくできるため、ビルの有効利用が図れる。
- リニアモーターの特徴である高速度を発揮でき、移動時間の短縮が図れる。特に、水平移動の場合には、気圧差が問題にならないため高速移送が可能になる。

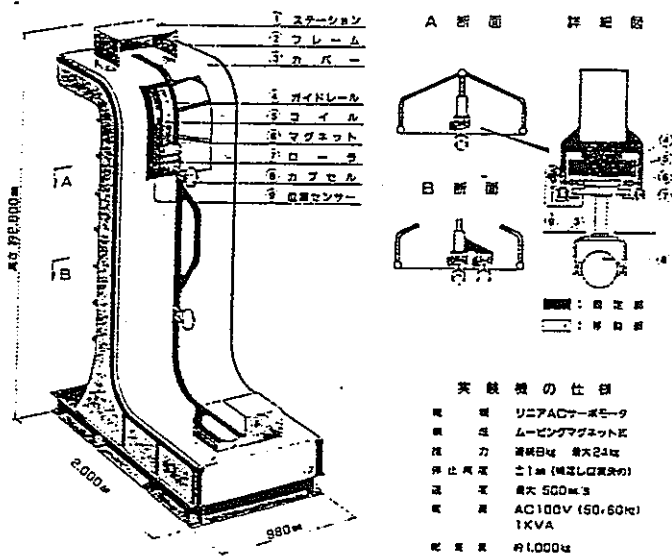


図2 DDエレベーター模型

・シャフトを繋いで循環路を形成することにより、1方向の連続的循環移動が可能になり、移送力が飛躍的に増大する。空間内に2方向のシステムを設けることにより、従来方式に比べてシャフトの占める空間容積が極めて少なくなり、ビルの有効利用が図れる。

DDエレベーターの駆動源

DDエレベーターに用いるリニアモーターとしては、リニア同期モーター (LSM) やリニア誘導モーター (LIM) が考えられる。

原理的には、両方式とも常電導コイルを用いて適用できるが、実際的には、移送重量や速度からくる必要推力、エレベーターのかごやシャフトのサイズの制限、消費電力等を考慮すると、超電導コイルを用いたリニアモーターを採用せざるをえないであろう。この場合、極低温の冷却装置を必要とする超電導コイルをエレベーターシャフト全域にわたって設置することは、経済的に困難であるから、表に示すようにかごに超電導コイルを備える方式を選定せざるをえない。もちろん、常温超電導材料が発見されればこの限りではない。

表において、超電導リニア同期モーター (SLSM) は、JRの磁気浮上鉄道の推進方式に採用されている方式であり、技術的な課題は残されているものの、一番実現が近い超電導リニアモーターの方式である。

超電導リニア誘導モーター (SLIM) は、現在では交流用超電導線材の性能が限られていることから、基礎的な研究にとどまっており、実用化までにはSLSMに比べて多くの開発課題が残されている。

また、SLSMでは、かごに搭載する超電導コイルの界磁は永久電流モードで行われるため、外部からのかごへの電

力供給は必要ないが、SLIMでは交流超電導コイルに交流電源を供給しなければならない、ケーブルを引き回さない電力供給方式を検討しなければならない。

こうした状況を考えると、DDエレベーターに採用されるリニアモーターは、現在のところ、SLSMになるであろうと予想される。この場合、かごの駆動制御はシャフト側の一次コイルによって行われるため、同一制御ゾーンでは複数のかごを別々に制御できないという問題点が残るが、これは制御ゾーンの細分化によって解決できる。

なお、DDエレベーターのコンセプトをアピールする突動模型が図2のようにできあがっている。これは、超電導コイルこそ用いていないが、将来、実用機で使われるであろうLSMを採用し、シャフト側に一次コイル、かご側に永久磁石を備えており、2台のかごが同時に駆動し、鉛直・水平・曲面移動を行うと同時に、中央の交差部においてすれ違いを行うモデルである。

今後の課題と将来展望

DDエレベーターは、まだ構想の域を脱しておらず、実用機の開発までには多くの課題をクリアしなければならない。技術的には、停電時の安全対策、超電導技術の確立、特にクエンチ対策、利用者への磁気遮蔽、消費電力を少なくするためのリニアモーターのギャップ管理、制御技術の確立等があり、運用上では、エレベーターの運転システム、関連法規をクリアする問題等がある。これらの目途がついた時点で、超超高層都市のモデルを設定し、本システムの概念設計、経済的FS等のケーススタディを行わなければならない。

DDエレベーターは、超超高層都市のみならず、従来規模の超高層ビルへの適用の可能性があるが、経済的FSの結果によってDDエレベーターが有効になるビルの規模が明らかになる。

いずれにしても、今後の研究開発は要素技術の実証から始まり、ステップごとに大型化した実験に移り、ある時点から超電導コイルを用いたモデル実験を行い、最終的には実大モデルによる実証実験へと進めなければならない。そして、実用機は、最初は物の輸送に使われ、安全性を始めとする十分な実証試験を経て、人員用の移送システムとして利用されていくと予想される。

おわりに

米国のロケットの父と呼ばれているDr. Robert H. Goddardの言葉、私はこれが好きです。

"It is difficult to say what is impossible, for the dream of yesterday is the hope of today and the reality of tomorrow."