

21세기 신에너지 가스 하이드레이트 연구 및 기술개발 현황 : 국내의 중장기 개발 방향

An overview of R&D for the natural gas hydrate of new energy in the 21st century : a vision of the multi-year project in Korea

이영철 (Young Chul Lee) · 백영순 (Young Soon Baek) · 조병학 (Byoung Hak Cho)
박기환 (Ki Hwan Park)* · 류병재 (Byong Jae Ryu)**

요 약

에너지 자원의 빈국인 한국은 에너지 자원의 기본적인 사용량 중에서 절대적인 양을 차지하는 석유 및 천연가스를 100% 수입에 의존하고 있다. 정부가 유사시 즉각적으로 실시하여야 할 중요한 역할 중의 하나가 이와 같은 유용한 에너지 자원을 다양하게 확보하는 것이다. 가스 하이드레이트는 천연가와 다른 형태의 에너지로서 그 매장량이 해양이나 영구동토지역 등 전세계적으로 분포되어 있으므로 가까운 미래의 천연가스 대체 자원으로서 주목을 받고 있다. 특히 한반도 주변의 동해에 많은 양의 가스 하이드레이트가 매장되어 있을 것으로 기대된다. 따라서 이 논문에서는 국내의 연구 및 기술개발 동향을 검토하여 탄성과 탐사를 통한 해석, 가스 하이드레이트의 특성 및 물리적인 물성, 그리고 가스 하이드레이트의 활용 기술 등에 관련된 국내의 중장기적인 가스 하이드레이트의 기본적인 연구 및 기술개발에 대하여 전체적인 프로젝트의 개요를 설명하였다.

주요어 : 가스 하이드레이트, 메탄 하이드레이트, 중장기 개발 방안, 탄성과 탐사, 물성, 활용기술

Abstract : Korea, an energy-resources-poor country, imports 100% of its oil and natural gas supply, which accounts for the greater part of its total primary requirements. One of the important task of the government is diversification of available energy resources such as oil and natural gas. Natural gas hydrate, which is non-conventional types of natural gas, distributes worldwide, especially in marine and permafrost. It would become a target of natural gas resources in the near future. Especially significant amount of hydrates are expected to be located in the East Sea around Korea Peninsular. This paper describes about a multi-year overall project framework of basic research and technological development of natural gas hydrate in Korea focused on the interpretation of the seismic survey, the characteristics and physical properties of the natural gas hydrate, and the utilizable technology of natural gas hydrates from the status of research and development of the world.

Key words : natural gas hydrate, methane hydrate, the multi-year project plan, seismic survey, properties, utilizable technology

서 론

석유 쇼크 후 많은 나라에서 경쟁적으로 석유·천연가스의 자원탐사에 인력과 자금을 투입하여 재래형의 석유·천연가스 자원을 채굴하게 되고, 각종의 화석연료자원에도 탐사와 기술개발의 노력을 기울이고 있다. 에너지 자원 중 석유·천연가스에 관한 한 100%를 수입에 의존하는 국내에서도 1979년부터 석유 개발을 시작하여 1981년에는 국내의 석유·천연가스 개발 분야에 많은 인력과 자금이 투자되고 있다. 그러나 최근에는 천연가와 다른 가스 하이드레이트 (natural gas hydrate, 기체수화물, 이하에서는 가스 하이드레이트라고 함)의 엄청난 매장량과 독특한 물성으로 인해 자원으로서의 가능성과 활용분야에 대해 근래에 와서

급속히 관심이 고조되고 있다. 가스 하이드레이트는 전세계로 해저에서는 수십 수백 미터 이하의 대륙붕 연변 (태평양 해구 및 대륙붕, 대서양 대륙붕 사면, 남극 대륙 주변 해역 등)과 육지에서는 영구동토지역 (시베리아, 캐나다, 알래스카 등)에 널리 분포되어 있다. 표 1은 메탄 하이드레이트의 추정매장량을 동토지역과 해상으로 구분하여 나타낸 것이다. 하이드레이트 형태로 되어 있는 탄소의 양은 약 10,000기가톤 (Gigaton, 1 Gt=10¹⁵ g) 또는 메탄으로 환산하면 1.8×10¹⁶ m³정도이고 이양은 메탄의 가체 매장량의 100배 정도이며, 메탄 상당 모든 화석원료의 2배에 달한다고 보고하고 있다 (Kvenvolden, 1988). 또한 최근에는 일반적인 추정매장량보다는 훨씬 작은 추정매장량을 보고되기도 하였다 (Ginsburg and Soloviev, 1995). 그들은 과거의 추정매장량들

한국가스공사 연구개발원(KOGAS, R&D training center, 638-1, II-Dong, Ansan, Korea)

*한국가스공사 기술기획실(KOGAS, office of technology and project planning, 638-1, II-Dong, Ansan, Korea)

**한국자원연구소 석유·해저자원연구부(Petroleum and Marine Research Division KIGAM, P.O. Box 111, Yusung, Science Town, Taejon 305-350, Korea)

Table 1. Geometry of cavities.

Hydrate Crystal Structure Cavity	I		II		III		
	Small	Large	Small	Large	Small	Medium	Large
Description	5 ¹²	5 ¹² 6 ²	5 ¹²	5 ¹² 6 ⁴	5 ¹²	4 ³ 5 ⁶ 6 ³	5 ¹² 6 ²
Number of Cavities/Unit Cell	2	6	16	8	3	2	1
Average Cavity Radius, Å	3.95	4.33	3.91	4.73	3.91 ^a	4.06 ^a	5.71 ^a
Energy Density, kcal/m ³	5.32 × 10 ⁵		1.46 × 10 ⁶		1.90 × 10 ⁶		
Volume of Methane, m ³	56.02		154.08		200.93		

a : Estimates of structure H cavities from geometric models.

이 퇴적물에서의 매장량을 높게 고려하였고, 연속적인 지역으로 고려하면서 과도하게 평가하였다고 발표하였다. 그렇다고 하더라도 표 1에서 보면 그 추정매장량은 10¹⁵ m³ 정도로 다른 원료와 비교하여 매우 엄청난 양임을 알 수 있다. 물론 하이드레이트의 추정매장량이 엄청나다고는 하나 수십 수백 미터 이상의 해저와 동토지역에 고체상태로 있기 때문에 가스로 회수하는데 기술적, 경제성 측면에서 많은 문제점을 제기하기도 한다 (Sloan, 1998).

이미 일본 주변해역에서는 탐사를 거쳐 확인된바 있으며 (Okuda, 1996) 국내에서도 동해안도 매장되어 있을 것으로 예상되므로 이에 대한 체계적이고 조직적인 연구 및 기술 개발이 요구되고 있다. 따라서 이 논문에서는 가스 하이드레이트에 대한 국내의 기술개발 동향을 살펴보고 한국에 적합한 기술개발 방향을 설정하고자 한다.

가스 하이드레이트 물성 및 특성

먼저 가스 하이드레이트를 간단히 알아보면, 고압·저온에서 가스와 물로 이루어진 물질로서 일반적으로 가스 하이드레이트라 하고 한국말로 하이드레이트는 수화물이라 한다. 가스가 메탄의 경우에는 메탄 하이드레이트라 하고, 이산화탄소인 경우에는 이산화탄소 하이드레이트라 한다. 천연가스에는 메탄이외에도 에탄, 프로판, 부탄 등이 포함되어 있으므로 천연가스로 이루어진 하이드레이트를 총칭하여 가스 하이드레이트라 한다.

이러한 가스 하이드레이트는 실험실적으로 가스와 물로 합성할 수 있으며 외견상으로 얼음보다는 드라이아이스와 거의 유사하며, 온도를 올려 실온이 되면 가스는 증발하고 최후에는 물만 남게 된다. 이러한 가스 하이드레이트의 가스 함유량은 1 m³의 가스 하이드레이트 (교·때 물의 체적은 0.8 m³) 안에 약 164 m³의 가스가 함유되어 있으며, 이러한 가스 양은 제조조건 및 구조에 따라 다소 차이가 있다 (Makogon, 1997). 또한 가스 하이드레이트에서 발생한 가스는 무색 무취이며, 불을 붙였을 때에는 화염의 색깔이 천연가스와 같이 오렌지색에서 파란색 영역까지 나타내고 있다.

가스 하이드레이트 구조

가스 하이드레이트의 구조는 물분자들로 이루어진 공간 안에 가스분자가 1개 들어가 있는 결정구조를 갖는다. 가스 하이드레이트를 구성하는 물분자들로 이루어진 공간은 기본적으로 그림 1과

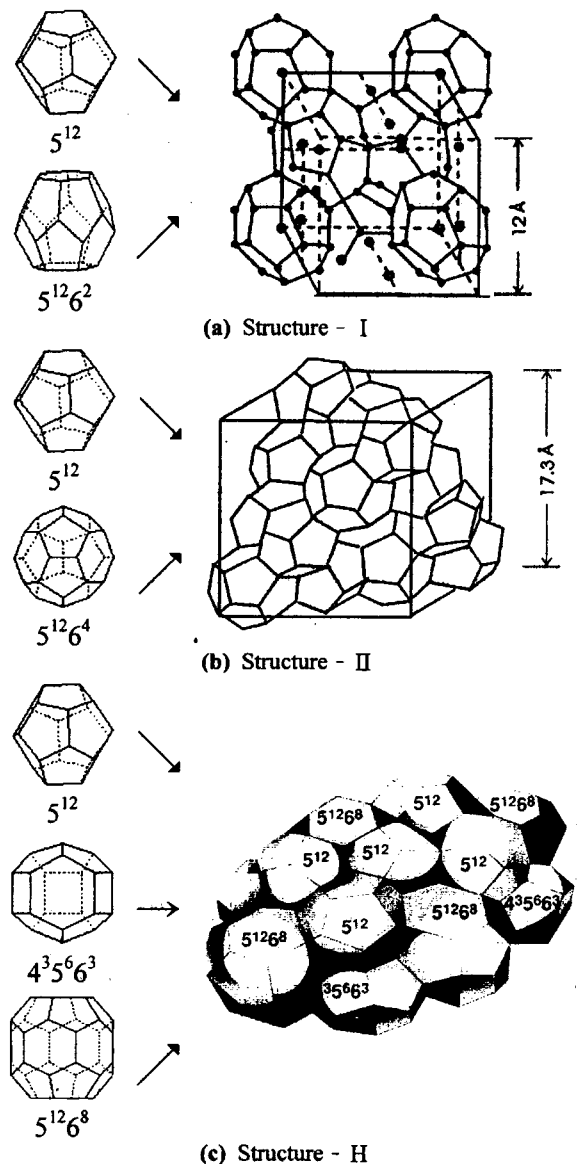


Fig. 1. The structures of natural gas hydrates.

같이 오각형 12면체 (5¹²), 오각형 12면 육각형 2면체 (5¹²6²), 오각형 12면 육각형 4면체 (5¹²6⁴), 오각형 12면 육각형 8면체 (5¹²6⁸), 사각형 3면 오각형 6면 육각형 3면체 (4³5⁶6³)로 이루어진

다면체로 되어 있다 (Jeffrey and McMullan, 1967 ; Lederhos *et. al.*, 1992). 일반적으로 천연가스 하이드레이트는 크게 3개의 결정구조로 이루어져 있으며, 체심 입방 구조 I (body-centered cubic structure I, sI), 다이아몬드형 입방 구조 II(diamond cubic structure II, sII)와 육방 구조 H (hexagonal structure H, sH) 등으로 이루어져 있다 (Ripmeester, 1991 ; Sloan, 1996). 또한 표 2에서는 각각의 공동 (cavity) 크기와 에너지 밀도 등을 나타내었다 (Jeffrey, 1984 ; Sloan, 1998 ; Khokhar, 1998). 각 다면체의 내부공동의 크기는 대략 반경 3.9 ~ 4.7 Å정도이며, 그

공동에 가스 분자가 충전되고 이러한 구조는 안정한 형태이다 (Jeffrey, 1984).

가스 하이드레이트 부존 영역

가스 하이드레이트는 고압 저온의 상태에서 안정적으로 존재하는데 가스가 메탄인 메탄 하이드레이트의 부존 영역을 그림 2에 나타내었다 (Claypool and Kaplan, 1974). 이 그림에서 메탄 하이드레이트의 부존 영역은 0°C에서 26기압, 10°C에서 76기압 이상의 압력이 요구된다고 하겠다. 또한 이 그림에는 메탄이외에도 이산화탄소 및 황화수소 하이드레이트의 상평형도도 나타내었다. 여러개의 선들 왼쪽 위 부분이 하이드레이트와 물의 부존 영역을 나타내며, 오른쪽 아래 부분이 유리gas와 물이 공존하는 영역을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 이산화탄소와 황화수소는 메탄 하이드레이트보다 고온·저압에서 안정한 것을 알 수 있다. [93% 메탄 - 7% 이산화탄소]를 나타내는 실선과 [98% 메탄 - 2% 황화수소]를 나타내는 실선은 메탄에 이산화탄소를 7% 함유한 가스와 황화수소가 2% 혼합된 가스의 가스 하이드레이트의 부존 조건을 나타낸 것이다. 이처럼 메탄 하이드레이트보다 부존 조건이 고온·저압에서 하이드레이트가 존재할 수 있으며, 가스를 혼합한 경우 혼합비에 따라 부존 곡선이 오른쪽 아래로 이동하게 된 것이다. 혼합된 가스 하이드레이트는 순수한 가스 하이드레이트의 안정영역의 중간으로 이동한 것을 볼 수 있다. 또한 [메탄 - 3.5% 염화나트륨용액]을 나타낸 실선은 3.5%의 염화나트륨을 포함한 용액을 가지고 메탄하이드레이트를 생성한 생성곡선을 나타낸 것이다. 순수한 물을 사용한 경우보다 약 1°C 저온에서 생성되고 있다. 이외에도 알코올, 아세톤과 같은 유기용제 등을 첨가 하였을 때에도 좀더 낮은 압력과 높은 온도에서 하이드레이트가 생성된다고 보고하고 있다 (Saito *et. al.*, 1996).

Table 2. Estimates of in situ methane hydrates.

Permafrost Hydrates [m ³]	Oceanic Hydrates [m ³]	Reference
5.7×10 ¹³	5~25×10 ¹⁵	Trofimuk <i>et al.</i> (1977)
3.1×10 ¹³	3.1×10 ¹⁵	McIver (1981)
3.4×10 ¹⁶	7.6×10 ¹⁸	Dobrynin <i>et al.</i> (1981)
1.4×10 ¹³		Meyer (1981)
1.0×10 ¹⁴	1.0×10 ¹⁶	Makogon (1988)
	1.8×10 ¹⁶	Kvenvolden (1988)
7.4×10 ¹⁴	2.1×10 ¹⁶	MacDonard (1990)
	2.6~13.9×10 ¹⁶	Gornitz and Fung (1994)
	10 ¹⁵	Gisburg and Soloviev (1995)

기술 개발 현황

가스 하이드레이트의 국내의 개발 현황

가스 하이드레이트를 이용하기 위해서는 여러 가지의 기술적·경제적인 과제가 있으므로 현재 개발 단계에 도달한 프로젝트는 서시베리아 메소야하 (Messoyakha) 가스전 이외에는 없으며, 그 이유로 매장위치가 육상의 영구 동토지역에 있어서 수오지로부터 거리가 2,000 km 이상이 되고 동토지역의 파이프라인 시설, 보온 대책 및 지반 침하 대책 등의 처리비용이 매우 많이 소요되기 때문이다. 해상에서는 대부분의 매장위치가 심해 2,000 m 이상의 해역에 부존되어 있으므로 심해에서의 채굴기술과 생산 기술 등의 개발이 필요하다. 따라서 관련 기술개발을 위하여 각 국의 기술개발 동향을 파악하고, 요소 기술에 대한 국가, 민간기관 및 대학 등이 협력하여 조사 및 연구개발을 실시하여야 한다.

가스 하이드레이트의 자원개발을 위하여 필요한 연구분야는 크게 기초 연구, 이용기술, 탐사 및 가스전 개발 분야로 분류할 수 있으며, 표 3과 같이 나타낼 수 있다 (Makogon, 1997). 이처럼 가스 하이드레이트와 관련된 연구분야는 다양하기 때문에 산·학·연의 유기적인 협조체제가 이루어지지 않으면, 가스 하이드레이트에 대한 기술개발이 어려울 것으로 판단된다.

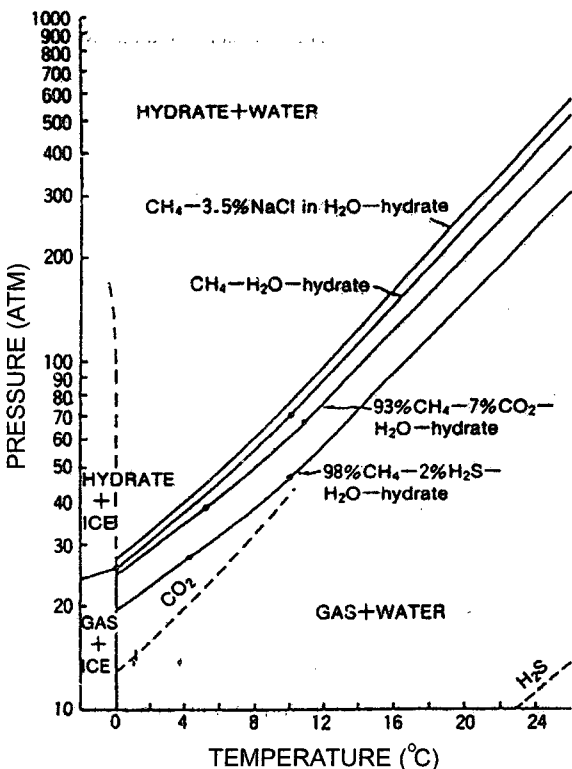


Fig. 2. Conditions of methane, carbon dioxide and hydrogen sulfide hydrates formation.

Table 3. Schematic of gas hydrates technologies.

분야	주요 내용
탐사 및 가스전 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 탐사 기술 · 자원량 평가 기술 · 시추 기술 및 생산 기술 (Well platform 및 pipeline 건설 조작 기술) · 하이드레이트 안정영역 (육상, 해양, 공기중) · 환경 영향 및 안전성 기술
기초 연구 분야	<ul style="list-style-type: none"> · 형성 조건 기술 · 저해 및 촉진 기술 · Morphology 분야 · 구조 및 물성 분야 · 동역학 모델링 분야
이용 및 활용 기술 분야	<ul style="list-style-type: none"> · 가스 저장 및 수송 분야 · Hydrate 기술 이용/활용 분야 · 의약 및 식품 분야 활용 · CO₂ 분리 및 제거 기술 · 염수 정제 기술 · pipeline plugging 제거 기술 · 안개 (fog) 제거 기술

국내의 기술개발 현황

가스 하이드레이트와 관련된 기술개발에 관한 국내의 연구는 극히 초기단계에 있으며, 한국자원연구소에서 1996년부터 가스 하이드레이트에 관한 기초 연구를 시작하여, 과학기술부 기관 고유사업의 일환으로 1997년부터 1999년까지 3개년간 가스하이드레이트의 부존 가능성 규명을 위하여 기초탐사와 더불어 일부 기초 실험을 수행하였으며, 수집한 자료의 분석을 통하여 가스 하이드레이트의 존재 가능성을 제시하였다. 또한 해양연구소에서도 1998년부터 수행한 탐사에서 이와 유사한 결과를 제시하였다. 국내 대학에서의 연구활동은 한국과학기술원에서 이전부터 하이드레이트에 대한 연구가 있었으며, 1998년도부터는 메탄 하이드레이트에 대해서도 형성 및 해리조건에 대한 연구를 시작하였다. 이 연구는 한양대학교와 고려대학교와 공동으로 진행되는 연구로서, 열역학 모델의 전산모사에 대한 연구와 가스 하이드레이트 형성 조건에 관한 연구가 진행 중이다.

그러나 이러한 연구는 국가적으로 조직적인 연구 수행이 아니었으므로 어떤 커다란 결과를 기대할 수는 없었다. 이에 반하여 일부 국가에서 국가기관이 주체가 되어 산·학·연이 유기적이고, 다양한 분야에서 조직적인 연구활동으로 구체적인 연구 결과들이 나타나고 있다. 따라서 이러한 각국의 연구활동을 살펴보면 다음과 같다.

미국의 개발 현황

미국에서의 가스 하이드레이트에 관한 연구는 파이프라인의 플러그 (plug)에 의한 현상 파악으로 시작하였으며 (Hammerschmidt, 1934), 1982년부터 1992년까지 DOE (Department of Energy, 에너지성)에서 800만 US\$를 가스하이드레이트의 부존지역과 열역학적인 특성에 대한 기초지식을 확립하는데 투자하였다 (DOE home page). 1990년에는 알래스카에서 가스 하이드레이트

에 관한 시험을 실시한바 있으며, 부존된 상황을 평가하여 대부분 해저 퇴적층에 약 $9 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 정도 매장되어 있다고 발표하였다 (Collett, 1996). 그리고 1997년 미 대통령 과학기술 자문위원회 (the President's Committee of Advisors on Science and Technology, PCAST)에서 발행한 21세기 도전을 위한 에너지 연구 및 개발에 관한 보고서 (Report on Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-Firs. Century)에 DOE/FE (Department of Energy Office of Fossil Energy, 에너지성 화석에너지국)가 산업계와 지질연구소 (USGS), 미해군연구소 (NRL), 가스연구소 (GRI) 등 다른 관련조직과 같이 "전세계적인 메탄 하이드레이트의 잠재력의 이해"에 대한 과학기반 프로그램을 수립하도록 하는 주요한 권고사항을 포함하고 있다. PCAST의 보고서에 의하면 첫째 연구비로 500만 US\$를 책정하고, 5년 차에는 1,200만 US\$를 책정하도록 제시하고 있다. 최근에 DOE, 산업계와 대학의 관계자들은 최종적인 목적을 위해서 향후 10년 동안 메탄 하이드레이트의 연구개발 프로그램에 총 1억 5천만~2억 US\$가 소요되어야만 할 것이라는데 의견이 일치하고 있다. PCAST의 권고와 더불어, 미 의회에서는 1997년 11월 Daniel Akaka 상원의원이 제출한 "메탄 하이드레이트 자원의 연구, 확인, 평가, 탐사 및 개발의 증진에 관한 법안" (Methane Hydrate R&D Act, S.1418)에 대한 상원 에너지 천연자원 위원회의 청문회가 1998년 5월 21일 열려 그해 7월 17일 통과되었다. 이 보고서에 의하면 향후 5년 동안 4,250만 US\$를 투자하여 가스 하이드레이트의 연구 개발을 수행하도록 하였다. 또한 상원 (U.S. Senate Bill S. 330)과 하원 (U.S. House of Representatives companion Bill H.R. 1753) 모두 1999년에 "메탄하이드레이트에 관한 연구 및 개발 법안" (The Methane Hydrate Research and Development Act of 1999)이 통과되어 국가적인 연구개발 프로그램이 진행될 수 있도록 지원하고 있다. 이와 더불어 DOE/FE는 다른 국가기관, 대학 및 산업계의 도움을 받아 "국가적인 메탄 하이드레이트 다년 연구개발 프로그램 계획" (National Methane Hydrate Multi-Year R&D Program Plan)을 1999년 6월에 수립하였으며, 프로그램의 목적을 달성하기 위하여 현재 예술의 단계에 있는 메탄 하이드레이트에 관한 기술을 기술적인 단계로 진행시키는데 연방정부의 역할이 있다고 규정하고 있다. 표 4는 미국의 개발 계획으로 각 분야에서 단위과제별로 실시 시점에 대해서 명시하였으며, 개발 계획의 목적은 안전하고 환경에 대해서도 문제가 없는 방법으로 하이드레이트에서 가스를 상업적으로 생산하여 21세기 에너지 시장을 혁신할 수 있는 선택을 강화하고, 성취하는데 필요한 연구, 개발 및 검증을 하는데 있다.

일본의 개발 현황

일본에서의 가스 하이드레이트에 대한 연구개발 활동은 미국보다도 더 적극적이고 신속하게 진행되고 있다. 1995년 이전에는 일본 내의 산업체, 국가기관, 연구소 및 대학 등에서 각각 연구활동을 진행하고 있었다. 그러나 1994년 6월 석유심의회의에서 「메탄하이드레이트에 관해서는 연구개발과제를 명확히 하기 위해 기초적 연구 및 기술개발을 추진하는데 있어서 자원량의 파악 및 장래의 상업화 가능성을 검토하기 위해 기초적 조사를 취급하는

Table 4. R&D program elements of U.S.A.

Activites	Sub-elements
Resource Characterization	- Resource Assessment (Near-Term) - Laboratory Studies - Field Geophysical, Geochemical, and Microbiological Studies - Predictive Models - Resource/Reserve Assessment (Mid-Term) - Economic Validation (Long-Term) - Technology Development
Production	- Primary Product, ion Research (Near-Term) - Reservoir Simulation and Process Design (Mid-Term) - Production Testing: Demonstration Well & Alternative Production Evaluation (Long-Term)
Global Carbon Cycle	- Mechanisms and Processes of Hydrate Flux (Near- to Mid-Term) - Consequences of Methane Release from Hydrates (Mid- to Long-Term) - Methane Release in the Geologic Record (Near- to Mid-Term) - Integrated Model Development (Long-Term) - Greenhouse Gas Mitigation (Near- and Long-Term)
Safety and Sea Floor Stability	- Basic Research in Safety and Sea Floor Stability (Near-Term) - Advanced Safety and Sea Floor Stability Model Development (Mid-Term) - Development and Field Demonstration/Testing of Safety and Sea Floor Stability Mitigation Techniques (Long-Term)

※ Near term: 2000~2004 year.
 Mid term: 2005~2009 year.
 Long term: 2010~2014 year.

Table 5. R&D program performance in Japan.

분야	년도	~ 1994 1995 1996 1997 1998 1999					
		1994	1995	1996	1997	1998	1999
기반기술	실험 장치 제조 및 물성 구조 규명	[Progress Bar]					
	BSR 분포도 작성 및 해석 기법	[Progress Bar]					
	BSR 수집자료 해석 기법 조사	[Progress Bar]					
	생성 촉진 및 저해제 개발 및 물성 모사	[Progress Bar]					
기초물리 탐사	탄성파 탐사, 지화학 탐사	[Progress Bar]					
	물리탐사 기술	[Progress Bar]					
실증정시추 및 기초시추	갱내 온도, 압력 모사 기술	[Progress Bar]					
	생산 기술 개발 (Kick-control 기술 등)	[Progress Bar]					
	실증정 시추 및 검증 : 캐나다 매켄지델타	[Progress Bar]					
	기초 시추 : 남해 trough(수심 950 m, 해저면 290 m)	[Progress Bar]					

조직이 필요하다」라는 지적이 있어서 통상산업성 자원에너지청 석유부에서는 1995년도부터 일본 석유공단에서 “국내외 석유천연 가스 기초조사 제8차 5개년 계획” 안에 메탄 하이드레이트 자원 조사 연구를 하도록 위탁하였다. 그리하여 석유공단에서는 장래의 개발가능성을 확인하기 위하여 국내외의 관계기관 등과 협력하여 조사연구를 1995년부터 1999년까지 5개년 계획을 진행하게 되었다. 표 5는 이때 실시한 연도별 실적을 정리한 것이다. 이 계획의 예산은 1998년 미국의 DOE 보고서에 의하면 약 5천만US\$ 정도 소요된 것으로 추정된다. 1996년에는 기초물리탐사를 2개 해역 (일본 남해 트로프 심해 분지와 오후츠크 해역)에서 진행하였으며, 1997년에는 실제적으로 시추시험을 위해 10월과 11월에는 러시아 시추선 (대수심 시추 리그)을 사용하여 메탄하이드레

이트 층을 관통할 수 없는 예비적인 시추를 남해 트로프 육측사면에서 실행하였다. 1998년에는 2월부터 3월까지 석유공단, 일본 탐사회사 (JAPEx) 및 캐나다의 지질연구소 (GSC)와 공동으로 육상 지역인 캐나다 북서부 매켄지 델타 지역 (Mallik L-38 well)에서 심도 1,150 m까지 시추하였으며, 온도압력을 유지할 수 있는 장치 (PTCS)를 사용하여 장치의 기능 점검과 이수 시스템의 검증 등 채굴에 필요한 여러 기술들을 실행하고 문제점에 대한 분석이 이루어졌다. 또한 1999년 11월에는 해상 지역인 남해 트로프에서 실제적으로 메탄 하이드레이트 층을 통과하는 시추시험이 진행중이나, 이에 대해 정보가 미비한 상태이다.

그러나 일본에서는 이러한 석유공단에서의 계획이외에도 그림 3에서와 같이 별도의 계획이 진행되고 있었다. 통상산업성 산하의

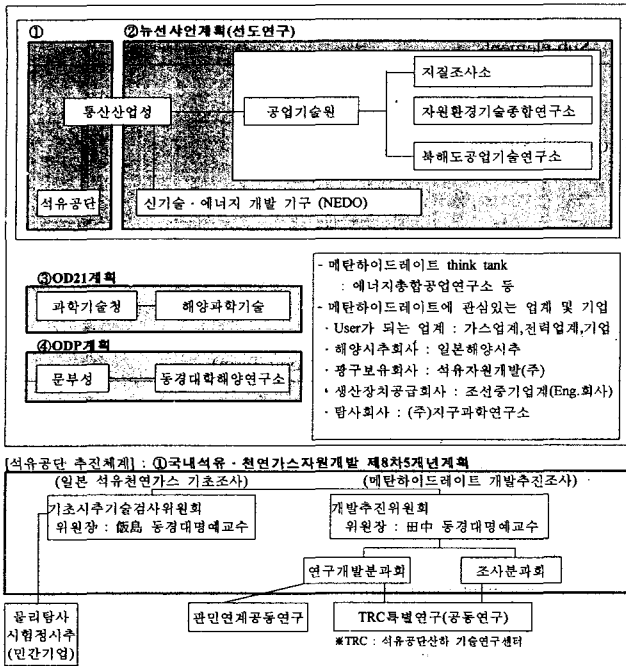


Fig. 3. The organization of natural gas hydrate R&D project in Japan.

일본 공업기술원에서는 1997년부터 “뉴선사인 (New Sunshine) 계획의 선도 연구” 테마로서 『메탄 하이드레이트의 자원이용에 관한 기술개발』을 선택하여 신에너지·산업기술종합개발기구 (NEDO)에서 이 연구 실시를 위탁하였다. 여기에는 공업기술원 산하의 지질연구소, 자원환경기술종합연구소,北海道 공업기술연구소 등이 참가하고 있으며, 실제적으로 채굴을 하지 않고 메탄 하이드레이트 기술개발에서 미진한 기초적 연구를 실시한다는 점에서 대단히 중요하다고 하겠다. 통상산업성 이외에도 과학기술청의 전문기관으로 있는 심해시추간담회에서 학술적인 조사를 위해 일본 독자의 “대수심시추 리그 (rig)”를 제시하였고, 이러한 연구를 과학기술청은 해양과학기술센터에 검토를 위탁하였다 (OD21 계획). 이 계획은 메탄 하이드레이트만을 대상으로 한 것은 아니고 일본열도 주변의 새로운 자원 및 특수환경미생물의 탐구, 지각변동 프로세스의 해명, 혹은 지구변동 예측도 포함되어 있다. 이 계획은 ODP (국제심해시추계획)의 차세대 계획인 IODP (통합국제심해시추계획)의 일환으로서 설립된 것이 특징으로 2003년 이후에 2,500 m급 시추선을, 그리고 장기적으로는 일본 전역의 대부분을 할 수 있는 심도 4,000 m급의 시추선의 확보를 목표로 하고 있다. 이 계획이 문부성에서 주관하는 ODP의 계획과 차이가 있는 것은 라이서 (riser) 시추라 하는 석유시추 기술을 이용하기 때문이다 (兼子, 1998 ; Hirota, 1996).

일본에서의 연구는 그림 3에 나타난 것과 같이 많은 국가 기관에서 주도적으로 진행하고 있지만, 국가기관이외에도 많은 업체 및 대학에서 함께 참여하고 있다. 참여 기업체 연구소로는 가스회사인 동경가스(주)의 프론티어테크놀로지 연구소와 오사카가스(주)의 기반기술연구소, 엔지니어링 회사인 미쓰비시중공업(주)의 다카사고 (高砂) 연구소, IHI(주)기술연구소 등에서도 가스 하이드

레이트에 관한 연구가 진행되고 있다. 또한 대학에서는 동경대학 이학부와 공학부, 오사카 대학 기초공학부, 교토 대학 공학부 및北海道 대학 등 많은 대학에서 연구가 이루어지고 있다. 일본 전체적으로 러시아, 미국 다음으로 많은 수의 연구자가 가스하이드레이트 분야에 매진하고 있는 것으로 추정된다고 보고하고 있다 (兼子, 1999).

러시아의 개발 현황

러시아에는 미국보다 가스 하이드레이트에 관한 한 적지 않은 연구결과를 보이고 있다. 동토지역에 널리 가스하이드레이트가 존재할 것이라는 가설을 발표하였고 (Stürzhov, 1946), 후에 1966년 Makogon에 의해 발전되고 다시 1970년에 Makogon에 의해 설립된 소련 연구자 그룹에서는 어떤 조건하의 지각 표면에서 가스 하이드레이트의 발견 가능성을 공식적으로 발표하였다. 흑해 (Black Sea)에서 처음으로 천연의 가스 하이드레이트가 발견한 (Yefremova and Zhizhchenko, 1972) 러시아는 이처럼 일찍부터 연구가 이루어졌으며, 현재 다음과 같이 4개의 연구 그룹이 활동 중에 있다. 첫째가 현재 러시아에서 가장 오래된 가스 하이드레이트 연구기관으로서 러시아 과학 아카데미 시베리아 분소 무기화학 연구소 (Institute of Inorganic Chemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, IICh SBRAS, Novosibirsk)이며 하이드레이트의 분자 동역학, 상평형, 고압의 생성조건, 구조 및 기본 물성 등에 대하여 연구가 진행되고 있다. 두 번째는 국제 해양 지질 및 광물자원 전체 러시아 연구소 (ALL-Russian Institute of the World Ocean Geology and Mineral Resources, VNIIOcean Geologia, Sankt-Peterburg)로서 해양의 가스하이드레이트 분야에서 가장 많이 알려진 러시아 연구 그룹이며, 퇴적물이 포함된 하이드레이트 물성, 지구 물리학 및 지화학 탐사, 및 자원량 평가 등의 분야에서 연구가 진행되고 있으며, 이 연구소가 특이한 것은 서시베리아 메소야하 (Messoyakha) 가스전에 대한 연구를 진행하였다는 것이다. 셋째는 러시아 과학 아카데미 시베리아 분소의 지구 cryosphere 연구소 (Institute of Earth Cryosphere of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, IEC SBRAS, Tyumen)로 계면활성제와 광물첨가제에 의한 가스하이드레이트의 동역학에 대한 연구를 수행 중인 가장 진보된 연구 그룹이다. 넷째 천연가스 및 가스 기술 전체 러시아 연구소 (All-Russian Institute of Natural gases and Gas Technologies, VNIIGAZ, Moscow)와 모스크바 주립 대학 (Moscow State University, Moscow)의 모스크바 조인트 하이드레이트 그룹으로서 기초 물성에서 현장 시추 샘플 회수연구까지 폭 넓고 가스하이드레이트의 전 분야에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Dr. Vladimir Yakushev home page). 이상에서와 같이 1990년대 이전에는 많은 연구가 진행되었고, 현재에도 많은 연구 그룹은 있으나, 최근에 국가적으로 조직화된 연구개발에 관한 계획이 없는 것으로 판단된다.

그 외 국가의 연구개발 현황

위에서 언급한 국가 이외에도 가스 하이드레이트에 관하여 국가적인 차원에서 연구개발을 진행하고 있는 국가로는 인도를 들

수 있다. 1997년 3월 인도의 석유산업개발위원회 (the Oil Industry Development Board of India)에서는 가스 하이드레이트의 탐사 프로그램에 대해 20억 루피 (5600만 US\$)를 투자한다고 발표하였으며, 이미 1억 루피는 탄성과 자료의 수집과 분석 (Phase I)을 위해 인가되었다고 한다. 마드라스와 켈커타 사이의 인도의 동쪽 해안에 있는 심도 600 m 이상의 가스 하이드레이트 전을 탐사하기 위한 심해 연구 개발 계획 (Phase II)에는 2개 이상의 탐색용 시추 작업도 포함하고 있다. 이러한 가스 하이드레이트 프로그램은 주 정부 소유의 오일 앤드 천연가스 위원회, 인디아 가스 주식회사 (Gas Authority of India Limited)와 인디아 기술 연구소 (the Indian Institute of Technology)들의 전문가를 초빙하여 가스전에서 가스를 생산하기 위한 새로운 기술들을 구체화하기 위한 것입니다 (Collett, 1998).

또한 국가적인 차원에서의 개발 계획은 추진되고 있지 않지만 이용 기술에 관한 한 많은 연구 결과를 발표한 나라는 노르웨이이다. 노르웨이는 북해의 Tommeliten Gamma field에서 Edda 플랫폼까지 12 km에 이르는 실험 파이프라인을 건설하고 천연가스의 생산·운송에서 가스 하이드레이트의 형성과 생성저해제에 관한 연구를 실시하였다 한다 (Austvik and Meland, 1992). 뿐만 아니라 하이드레이트에 의한 가스 저장 및 수송에 관한 가능성 및 그 공정 개발에 관하여 엔지니어링 회사인 Akar사와의 공동 연구 결과가 계속적으로 발표하였고, 특히 기존의 액체 수송 방법인 LNG시스템과 비교하여 약 24%의 비용절감이 예상되어 지므로 고체 수송에 대한 많은 사람들의 관심이 고조되고 있다 (Gudmundsson *et al.*, 1994). 현재 노르웨이에서는 1997부터 가스 하이드레이트의 저장·수송에 관한 연구를 진일보시키기 위해 Gudmundsson 연구 그룹, Aker 엔지니어링 회사, 및 6개의 오일 회사들이 참여하여 조인트 인더스트리 프로젝트 (Joint Industry Project at NTNU)를 실시하고 있다 (NGH at NTNU home page).

이 밖에 영국에서는 국가적인 개발 계획에 대한 발표 및 보고는 없으나 가스회사인 BG plc에서는 자체기술로 1997년 중반에 가스 하이드레이트를 1일 1톤 생산할 수 있는 파일럿 공장을 건설하여 운영 중에 있는 것으로 보아 이미 오래 전부터 이 분야에 대한 연구 개발이 이루어진 것으로 판단된다 (BG technology home page).

이 외에도 캐나다, 우크라이나, 독일, 중국, 및 덴마크 등 각국에서는 국가차원의 개발 계획 또는 국가 차원의 개발 계획은 수립되지 않았지만 기업체 및 대학들에서 지속적이고 광범위하게 연구가 진행되고 있다.

우리나라의 가스 하이드레이트 기술개발 방향

이 분야에서 초보단계인 우리나라로서는 가스 하이드레이트 기술개발 사업의 특성상 한정된 연구비와 연구인력을 보유하고 있으므로 각 분야에서 중복 연구 활동이 없는 체계적인 계획 수립과 수행이 요구되고 있다. 그러므로 최종 목표를 가스 하이드레이트의 개발·생산과 아울러 이용 기술 분야에서 수송 및 저장 기술개발에 두고, 향후 20개년 동안 처음 1~2 단계는 5개년씩 실시하고, 마지막 3 단계는 10개년으로 구분하여, 크게 4개

분야에서 수행할 증장기 기술개발 계획안을 수립하였다. 이번에 작성한 국내 가스 하이드레이트 증장기 기술개발 계획안은 국내에서 축적된 가스 하이드레이트 관련 기술을 바탕으로 외국기술 개발 방법을 벤치마킹하여 한국가스공사와 한국자원연구소가 합작으로 작성한 자료를 산업자원부에 제출한 것으로 1단계를 제외하고 구체적인 단계별 사업 계획이 확정되지 않은 상태이다.

이 증장기 기술 개발 계획안에 따르면 1 단계는 2000년부터 2004년까지 5개년 동안 한국가스공사에서 15억을 투자하고 정부 지원금 11억 (총 26억)으로 한국자원연구소, 한국가스공사 및 학계에서 실시할 예정이며, 탐사 분야는 동해의 울릉분지를 5개 구역으로 구분하여 광역탐사를 실시하여, BSR 분포도를 작성하고 부존 유망지역을 선정한다. 또한 기초적인 물성 및 천연가스의 조성이 가스전마다 다르기 때문에 그에 대한 가스 하이드레이트의 최적의 구조 및 평형조건을 검토하고, 결정 성장 및 분해에 의한 동역학적 모델을 수립한다. 또한 이용 기술 분야에서는 가스 하이드레이트의 실험실적 제조 장치를 제작하여 각 조업 조건에 따른 변화를 분석한다. 또한 2단계에서는 광역탐사 자료를 토대로 부존 유망지역에서의 정밀탐사를 수행하여, 시험정 위치의 선정과 자원 매장량 평가를 실시하고, 회수 기술 및 생산 기술개발도 수행한다. 또한 활용기술 분야에서는 파일럿 생산 시설 (pilot plant)의 설계와 개발이 진행될 예정이다. 마지막 3단계에서는 가스 하이드레이트의 개발과 가스의 생산을 최종 목표로 하여 해상에서의 시추기술 개발 검증, 시험 생산 및 공정개발의 수행, 생산정에서의 생산력 평가와 매장량에 따른 경제성 평가를 실시한다. 또한 활용기술 분야에서는 수송 및 저장이 가능한 공정개발을 수행한다. 이러한 가스 하이드레이트 기술 개발의 목표를 성공적으로 달성하기 위해 기대되는 각 분야에서의 역할을 살펴보면 다음과 같다.

정부의 역할

현재 가스 하이드레이트에 탐사 및 기술개발에 관한 정부의 역할은 우선 이 과제를 국가적인 과제로 선정하여 한반도 동쪽 울릉분지에 대한 광역탐사와 그에 수반되는 기초연구를 실시하여야만 한다. 가스 하이드레이트 탐사 및 기술개발에 관련한 사업은 탐사는 물론 시추기술 개발에 엄청난 투자비가 소요되므로, 증장기 기술개발 계획의 관련 자료에 의하면 대략 2005년부터 실시될 5개년 2단계 사업에는 약 200억원 이상이 소요될 것으로 판단되므로, 기업체와 연구기관이 독자적으로는 할 수 없는 대규모의 기술개발사업이 실제적으로 원활히 진행되기 위해서는 국가적인 대규모 투자를 하여야만 할 것으로 판단된다. 따라서 향후의 정부의 적극적인 참여와 국내의 모든 기관을 유기적으로 결합하여 최고의 결과를 도출할 수 있는 정부의 역할이 기대된다.

현재까지 국내에서 가스 하이드레이트에 관한 탐사 작업에는 정부출연연구기관인 한국자원연구소와 한국해양연구소의 역할이 대단히 컸다고 사료된다. 특히 향후 실시될 가스 하이드레이트의 탐사 및 기술개발에 관한 1단계 계획을 수립하는 부분에서 결정적인 기여를 하였다. 또한 2000년부터 수행할 1단계 5개년 계획에 주도적인 역할을 하기로 결정되었으며, 광역탐사가 이루어진 후에는 그 결과에 따라 2단계 사업으로서 정밀탐사 등에 대한 연구

개발 사업이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 그러므로 가스 하이드레이트의 기술개발 사업을 성공적으로 이루어지기 위해서는 한국자원연구소의 특성을 살린 분야, 즉 탐사 및 생산 기술 개발에서 많은 역할이 기대된다.

기업체의 역할

궁극적인 목적이 이익추구인 기업체들에게 많은 시간이 요구되는 가스 하이드레이트의 기술개발에 투자를 요구하는 것은 문제점이 있을 것이다. 각 국의 예에서 보면 가스 하이드레이트의 탐사 및 개발사업에 기업체 중 가스회사가 많은 부담을 담당한 예는 없으며, 실질적인 수행에 있어서도 주도적으로 수행한 예도 없다. 그리고 각국의 예에서 가스 하이드레이트 분야의 연구 개발에 투자하는 가스회사 이외의 기업체가 한정되어 있다는 것을 알 수 있다.

그러나 각국의 여러 가스회사에서는 가스 하이드레이트의 이용 기술개발 분야 특히 수송 및 저장 기술 분야에 많은 연구 인력과 연구비를 투자하고 있음을 볼 수 있다. 특히 영국의 BG plc의 경우에는 자체적인 기술로 실험 생산 설비를 갖고 있고, 일본의 도쿄가스 (Toshihara, 1997)와 오사카가스 (Kenji and Akira, 1999), 그리고 독일의 Ruhr Gas (Nixdorf and Oelrich, 1996)의 경우에도 이러한 수송 및 저장 기술 분야에 많은 성과를 내고 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이 분야에 있어서도 실험 장치의 scale-up한 파이로트 플랜트의 실험에 상당한 비용이 예상되므로 연구 자금의 조달, 구체적인 실시 대상의 선정과 고객 니즈(needs)를 파악하는 것 등 상업화를 향해 해결해야 할 문제점들이 많다고 하겠다. 그렇지만 가스 하이드레이트의 이용 기술이 LNG 기술과 비교하여 많은 비용 절감이 가능하므로 LNG기술로는 경제성이 떨어지는 중소 가스전의 개발에 이용할 수 있다는 점에서 장래에 이 분야에서 커다란 이익이 기대된다고 하겠다.

현재 가스 하이드레이트에 관한 연구 수행의지를 구체적으로 발표한 기업체는 거의 없는 상황이지만, 자료 및 정보 수집 차원에서 관심을 갖고 있는 기업체들은 1~2 업체가 있을 정도이다. 이 점에서 일본 및 노르웨이의 선박 제조 및 엔지니어링 회사들의 투자가 좋은 예가 될 수 있을 것이다. LNG 수송 및 저장 설비 제작에 많은 노하우를 갖고 있는 선박 제조사 및 엔지니어링 회사들이 수송 및 저장 분야의 연구 개발에 많은 관심과 연구 개발이 이루어지고 있다는 것이 많은 것을 시사한다고 하겠다. 그러므로 다양한 분야와 많은 연구 개발비용이 소요되는 가스 하이드레이트의 연구개발 사업 특성상 국내에서도 향후 많은 기업체들의 참여와 역할 분담이 기대된다.

대학의 역할

가스 하이드레이트의 연구는 특성상 기초 분야에 대한 충분한 연구가 필수적이다. 다수의 가스의 조성에 대한 결정구조 해석, 물성치 측정, 물리화학적 평형조건 연구, 다양한 이론 연구와 시뮬레이션 연구 등 많은 분야에서 연구를 실시하여야 한다. 특히 국내에서의 가스 하이드레이트 분야에 대한 연구 인력이 얼마 되지 않기 때문에 대학이 기초적·교육적인 기관으로 향후 역할이 기대되며, 연구비 지원도 확대되어야 할 것으로 기원한다. 물론

이번에 작성한 중장기 기술개발 방안에 단지 1단계만 계획한 것은 가스전 개발에 필요한 연구에 한정되었기 때문이지만 실제적으로 각 단계에서 과제별로 진행이 될 경우 동시에 기초 물성에 대한 연구가 병행하여 이루어져야만 효과적이고 성공적인 결과를 기대할 수 있을 것이다.

결 론

가스 하이드레이트는 '엄청난 추정매장량과 독특한 특성으로 인해 근래에 급속도로 관심이 집중되고 있으며, 외국에서도 가까운 미래에 천연가스 대체 자원으로서 부각되고 있는 물질이다. 또한 동해안에 부존 가능성이 있으므로 에너지 자원을 확보할 수 있으므로, 석유·천연가스 자원을 거의 수입하는 우리나라로서도 이에 대한 기술개발 계획을 추진해야만 할 것이다. 그러나 우리나라의 가스 하이드레이트의 연구 분야는 아주 초보적인 단계이며, 특히 물성 자료 또한 충분치 못하고, 실질적인 연구 인력 또한 많지 않은 실정이다. 따라서 이렇게 불모지와 닮없는 국내 상황에서의 가스 하이드레이트의 중장기 기술개발 방향을 각국의 연구개발 계획 및 실행과정을 조사·검토하여, 최종적으로 우리나라의 가스 하이드레이트의 탐사를 통한 매장량 평가와 생산을 위한 기술개발을 목적으로 작성하였다. 또한 가스 하이드레이트의 독특한 특성을 이용한 수송 및 저장 기술개발을 달성하기 위한 방안도 병행하여 수행할 수 있도록 하였다. 여기서 제시한 중장기 기술개발 방향은 전체적인 가스 하이드레이트 사업을 위해 필요한 아주 기본적인 부분만을 고려한 것으로, 일본과 미국의 예처럼 완벽한 가스 하이드레이트 기술개발 사업의 성공적인 수행을 위해 환경 영향 평가나 생산시 안전성에 대한 분야 등에서도 별도로 보완된 기술 개발 계획이 동시에 이루어져야만 할 것으로 판단된다. 이와 더불어 가스 하이드레이트에 관한 연구 인력의 양성과 이에 대한 정부, 정부출연 연구기관, 기업체 및 대학에서 다방면으로 투자가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- Austvik, T. and Meland, B., 1992, *Proceeding of multiphase transportation III*, Reslashros, Sep. 20-22, 1p.
- Claypool, G.E. and Kaplan, I.R., 1974, *in Natural Gases in Marine Sediments (Plenum Press)*, 95p
- Collett, T.S., 1998, *Oil & Gas Journal*, May, 11, 90p.
- Dobrynin, V.M., Korotajev, Yu., P. and Plyushev, D.V., 1981, *Long Term Energy Resources*. (R.G. Meyer and J.C. Olson ed.) Pitman, Boston. 727p
- Gornitz, V. and Fung, I., 1994, *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 335p
- Ginsburg, G.D. and Soloviev, V.A., 1995, *Proc. 27th Ann Offshore Technology Conf.*, Houston, May 1-4, 513p.
- Gudmundsson, J.S., Parlaktuna, M. and Khokhor, A.A., 1994, *SPE Production & Facilities*, Feb., 69p.
- Jeffrey, G.A. and McMullan, R.K., 1967, *Progress Inorganic Chemistry*, 8, 43p
- Jeffrey, G.A., 1984, *Inclusion Compounds*, Vol 1, Acad. Press(J.L. Atwood, J.E.D. Davis, D.D. MacNichol, eds), 135p

- Kenji, Y. and Akira, U., 1999, *Osaka Gas R&D Forum '99*, 58p.
- Khokhar, A.A., Gudmundsson, T.S. and Sloan, E.D., 1998, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 150-151, No. 9, 383p.
- Kvenvolden, K.A., 1988, *Chem. Geol.*, 71, 41p.
- Lederhos, J.P., Mehta, A.P., Nyberg, G.B., Warn, K.J. and Sloan, E.D., 1992, *AIChE Journal*, 38, 1045p
- Makogon, Y.F., 1997, *Hydrates of Hydrocarbons*, Penwell, Oklahoma, 287p
- Makogon, Y.F., 1988, *the Third Chemical Congress of North America*, Toronto, Canada, June 5-10.
- McDonald, G.J., 1990, *Climatic Changes*, 16, 247p.
- McIver, R.D., 1981, *Long Term Energy Resources*, (R.G. Meyer and J.C. Olson ed.) Pitman, Boston. 1p, 713p.
- Meyer, R.F., 1981, *Long Term Energy Resources*, (R.G. Meyer and J.C. Olson ed.) Pitman, Boston. 49p.
- Nixdorf, J. and Oellrich, L.R., 1996, in *Proc. 2nd International Conference on Natural Gas Hydrates*, Toulouse, France, 17p.
- Okuda, Y., 1996, in *Proc. 2nd Int. Conf. on Natural Gas Hydrates* (Monfort, J.P. ed.) Toulouse, France, 2-6 June, 633p
- Ripmeester, J.A., 1991, Spring Meeting, April 10, Houston.
- Saito, Y., Kawasaki, T., Okui, T., Kondo, T. and Hiraoka, R., 1996, in *Proc. of 2nd Int. Conf. on Natural Gas Hydrates* (Monfort, J.P. ed.) Toulouse, France 2-6 June, 459p
- Sloan, E.D. Jr., 1996, *Gas Hydrates First Master Workshop*, Sep. 18-20, Gent, Belgium.
- Sloan, E.D. Jr., 1998, *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, Marcel Dekker, Inc., 459p.
- Strizhov, I.N. and Khodanovich, I.E., 1947, *Gas Production*, Moscow.
- Toshiharu, O., 1997, *日本エネルギー學會誌*, 第76卷 第5號, 390p.
- Trofimuk, A.A., Cherskiy, N.V. and Tsarev, V.P., 1977, *Future Supply of Nature-made Petroleum and Gas* (R.F. Meyer ed.) Pergamon Press, New York, 919p.
- Yefremova, A.G. and Zhizhchenko, B.P., 1974, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 214, Moscow, 1179p.
- 兼子 弘, 1998, *日本造船學會誌* 第 827號, 332p.
- 兼子 弘, 1998, *日本造船學會誌* 第 827號, 586p.
- http://www.fe.doe.gov/oil_gas/methanehydrates.
- <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/Node/1622>.
- <http://www.ipt.unit.no/~ngh/library>.
- <http://www.bgtech.co.uk>.

(2000년 1월 21일 접수)