ISSN 1881-4131 CODEN SGKYAO

2025 石油技術協会誌 Solution 500 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology





会

石油技術協会役員・委員長・幹事

							会	長	髙	橋	利	5	宏							
							副	会長	島	本	辰	-	夫							
							副	会長	吉	良	仁	-	秀							
									理	事										
狩	野	彰	宏	亀	尾	浩	司	城	戸	大	作		玉	末	彰	司	倉	本	真	
栗	原	敏	之	小	林		修	佐	藤	光	\equiv		菅	井	裕	<u> </u>	杉	村	有	\equiv
土	屋	範	芳	長	縄	成	実	中	西	健	史		畠	Ш	厚	志	林	田	泰	行
原			崇	日	野	智	之	福	田		豊		藤	井	哲	哉	船	津	邦	浩
古	井	健	<u> </u>	松	島		潤	村	田	澄	彦		Щ	田	泰	広	Ш	本	浩	\pm
Ш	本	晃	司	Ш	本	Æ	伸	吉	畄	秀	佳		吉	田		剛				
									監	事										
				市	Ш		真	樋		朋	之		横	井		悟				
									幹	事										
石	下	洋	平	市	江	康	高	今	井	素	直		内	山	亮		後	藤	彩	恵
近	藤	秀	樹	今	野	義	浩	草	宮	尚	隆		佐	々木	祐	i樹	鈴	木	清	史
高	原	<u> </u>	峰	知	識	源	由	土	田	邦	博		藤	田	和	宏	Ш			明
						会言	ま編 集	委員	長		小	林		肇						
						探翁	広技術	「委員	長		佐	藤	雅	紀						
						作扌	‡技術	「委員	長		北	村	巃	太						
						生產	崔技 徘	「委員	長		村	上	貴	浩						
						СС	S 委	員	長		長	縄	成	実						
						ΗS	E 委	員	長		吉	田		岡川						
						玉	際委	員	長		山	本	晃	司						
						資測	原経 澾	「委員	县長		岩	間	剛	<u> </u>						
						ホー	ムペー	ジ委	員長		島	本	辰	夫						

複写される方へ 石油技術協会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社 Making a copy of this publication 団法人学術著作権協会に委託しております。 本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作 権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内 reproduction. 利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人複写権 センター ((社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権 利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を終結している 場合にあっては、その必要はございません(社外頒布目的の複 <Except in the USA> 写については,許諾が必要です)。 権利委託先 一般社団法人学術著作権協会 〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル <In the USA> FAX: 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp 複写以外の許諾(著作物の引用, 転載, 翻訳等)に関しては,(社) 学術著作権協会に委託致しておりません。直接、石油技術協会 へお問い合わせ下さい。 石油技術協会 TEL: 03-3214-1701 FAX: 03-3214-1703 Clearance (JAACC) E-mail: office@japt.org

Reprographic Reproduction outside Japan

Please obtain permission from the following Reproduction Rights Organizations (RROs) to which the copyright holder has consigned the management of the copyright regarding reprographic

Obtaining permission to quote, reproduce; translate, etc. Please contact the copyright holder directly.

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JACC), Inc. 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan FAX: 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

Copyright Clearance Center, Inc. 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA Phone 978-750-8400 FAX 978-646-8600

Users in countries and regions where there is a local RRO under bilateral contract with Japan Academic Association for Copyright

Users in countries and regions of which RROs are listed on the following website are requested to contact the respective RROs directly to obtain permission.



石油技術協会誌

第90巻 第2号(令和7年3月)

一目 次一

令和6年度秋季講演会「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」

開会の辞	髙橋	利宏 …	37
水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援			
~グリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介~	本橋	貴行 …	39
ゼロエミッション火力の導入に向けた取り組み	高橋	賢司 …	45
新潟県柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・利用一貫実証試験の概要 さ	ī座野	洋志 …	50
天然水素の動向~クリーンエネルギー資源としての可能性と課題~	∖杉 芰	そ由美 …	55
カーボンニュートラルに向けたアンモニアの役割	村木	茂 …	61
閉会の辞	島本	辰夫 …	67

論 文

単一の常設震源 ACROS	S を用	いたタイムラ	プス地震探査	の取り組み			
	清水	英彦・下田	直之・田中	宏明・小西	祐作・ホワイト	ドン・ニッケル エリック・	·· 70

解 説

]	BP/EI 統計から見た中国における再生可能エネルギー事業の現状						
講	演						
1	多孔質岩石の物性	… 西澤	修… 85				
1	岩石物性の変化に基づく多孔質岩石中の二相流体挙動の推定 北村 圭吾・本田 博之	<u>く</u> ・三谷	泰浩 … 93				
(CO2 圧入時における砂岩の弾性波速度挙動に関する実験 青野 哲雄・佐野 徿	タ・水谷	雄太 … 101				
1	傾斜薄互層の力学特性に関する考察と岩石物理学 柏原 功治	・山本	哲也…115				
_	ュース						
,	石油技術協会記事						
ţ	坑井掘削状況						
Ż	編集後記						



Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology

Vol. 90, No. 2 (March, 2025)

- Contents —

Autumn Meeting	
"Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia	ı"
Opening address ······Toshihiro Takahashi ··· 3	37
JOGMEC's financial support for hydrogen and ammonia projects	
– Introduction of project evaluation for e-fuel projects that utilize green hydrogen feedstockTakayuki Motohashi … 🗧	39
Initiatives toward the introduction of zero-emission thermal power plants	45
Overview of the Kashiwazaki Clean Hydrogen and Ammonia Project in Niigata Prefecture 🚥 Hiroshi Kozano 🚥	50
Natural hydrogen –potential and challenges as a clean energy resource	55
Role of Ammonia toward Carbon Neutrality	61
Summary of closing remarks ····· Tatsuo Shimamoto ··· 6	67
ORIGINAL ARTICLE	
Application of time-lapse seismic technology using a single permanent source ACROSS	
······· Hidehiko Shimizu, Naoyuki Shimoda, Hiroaki Tanaka, Yusaku Konishi, Don White and Erik Nickel ··· 🤅	70
GLOSSARY	
Overview for the current status of renewable energy projects in China based on the BP/EI Statistical Review of World Energy	
······ Atsushi Nabetani ··· 8	81
LECTURES	
Physics of porous rocks······Osamu Nishizawa ··· 8	85
Estimation of two-phase fluid behavior in porous rocks based on rock properties	
	93
Elastic wave velocity behavior of sandstone during CO_2 injection \cdots Tetsuo Aono, Toru Sano and Yuta Mizutani \cdots 10	01
Rock physics and petrophysics for geomechanical modeling of dipping thin layers	
\cdots Koji Kashihara and Tetsuya Yamamoto \cdots 1	15
NEWS	00
Drilling activities in Japan	22 26
Postscript	26

左 :山形県酒田市玉簾の滝 青沢層玄武岩の柱状節理(提供:JAPEX)

右 上:北海道厚岸郡浜中町 根室層群厚岸層 海底チャネルを埋積する塊状タービダイト (提供:JAPEX) 右 下:秋田県男鹿半島生鼻崎に露出する更新統北浦層露頭における地質巡検風景 (提供:INPEX)

left: Columnar jointing in the basalt of the Aosawa Formation at the fall of Tamasudare, Sakata city, Yamagata prefecture (provided by JAPEX)

Upper right : Massive turbidite filling the submarine channel in the Akkeshi Formation in the Nemuro Group, Hamanaka Town, Hokkaido prefecture (provided by JAPEX)

Lower right : Geological field trip at the Pleistocene Kitaura Formation outcrop, exposed at Oibanasaki, Oga Peninsula, Akita Prefecture (provided by INPEX)

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)37 ~ 38 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 37~38

令和6年度秋季講演会

「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」

Autumn Meeting

"Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia"



Opening address of the Autumn meeting by Toshihiro Takahashi

皆様 おはようございます。会長の髙橋利宏でございます。どうぞよろしくお願い申し上げます。

まず本日はご多忙の中,小柴ホールにお越しいただきました皆様,また,国内外で本講演会をオンライン配信でご視聴の 皆様に心より厚く御礼申し上げます。

さて、本日、当協会の行事に初めて参加された方もおられると思いますので、最初に石油技術協会について紹介をさせて いただいたのちに、今回の講演の選定経緯についてお話したいと思います。

石油技術協会の創立は 1933 年であり、今年で 91 年目を迎えます。当協会の現在の会員数は、賛助会員 61 団体を含めま すと 1613 名でございます。化石燃料を扱う石油開発業界にとって、今は大きな転機と変革の時期であります。気候変動へ の取り組みや低炭素社会の実現に向け、世界的な動きが加速している中、当協会でも外部環境の変化に応じて柔軟に対応す ることが求められています。具体的な取り組みとして、昨年度は小寺前会長の主導のもと将来像検討会を立ち上げ、その中 で当協会のミッションとビジョンを策定し、協会員の皆様と共有することができました。具体的には協会のミッションは、「石 油・天然ガス鉱業及びこれに関連する科学・技術の進歩普及への貢献を通じ、地球環境を保全しながらエネルギーの安定供 給に資する」こととし、会則の目的として明記しております。

さらに、当協会として、カーボンニュートラルへ向けたさまざまな取り組みの中で、特に私たちが保有する技術に親和性が高く、かつ国内外で具体的な事業化の取り組みが進んでいる二酸化炭素の地中貯留分野に着目し、CCS 委員会を新設しました。今後、石油開発で培った技術、それに知識と経験を同分野に還元・活用しながら、さらなる技術の研鑽と発展を目指すとともに、carbon capture and storage (CCS) に関しては二酸化炭素の貯留だけでなく、分離・回収・輸送を含めた方々との人材交流と情報共有を通じて、低炭素社会に向けた取り組みに貢献していくことを目指して参ります。

また当協会のビジョンは「石油・天然ガス開発は、重要かつ高度な技術の蓄積によって成り立っており、それに関連する 技術は、エネルギーの安定供給を果たす上で今後も不可欠なものである。さらに、石油・天然ガス開発において培われた技 術は、地熱開発や CCS 等地下流体を扱う分野で応用されており、石油開発技術者は、カーボンニュートラル社会の実現の ために必要な新しい分野での技術開発においても、貢献することが期待されている。」としています。したがいまして、当 協会といたしましては二酸化炭素の地中貯留にとどまらず、カーボンニュートラル社会実現に向けたさまざまな取り組みに ついて他分野・他業種の方々との人材交流と情報共有をおこなって参りたいと考えております。

そういった経緯の中で、本日の講演会のテーマを「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア〜」 とさせていただきました。2024年1月に経済産業省による水素・アンモニア政策小委員会などによって、2050年のカーボ ンニュートラルの実現に向けては、安全性を確保しながら、低炭素水素などの活用を促進することが不可欠であることから、

^{*} 令和 6 年 11 月 12 日, 令和 6 年度秋季講演会「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 Opening address at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{**} 石油技術協会会長 JAPT President

電力部門における脱炭素電源の拡大,産業・民生・運輸部門における脱炭素化された電力による電化,水素,アンモニア, 合成メタン(いわゆる e-methane)および合成燃料(いわゆる e-fuel)を通じた熱利用などの脱炭素化の取り組みを進める ことが必要とされる旨,中間とりまとめとして公表されました。さらに 2024 年 10 月 8 日にはこれらの取り組みを促進する ために「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行のための低炭素水素等の供給及び利用の促進に関する法律」いはゆる「水素 社会推進法」を施行するための関係政令が閣議決定され,10 月 23 日に同法令が施行されたところであります。

このように環境負荷を低減させる低炭素社会の実現に向けて、新たな技術の社会実装に向けたさまざまな取り組みが進め られているところであります。本日は7つの講演からなり、午前の部では、最初に経済産業省の廣田大輔様から「水素を巡 る最近の動きについて~水素社会推進法~」についてご講演いただき、続いてJOGMEC本橋貴行様からは「水素・アンモ ニアプロジェクトに対するJOGMEC支援」のうち、特にグリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価について ご紹介いただく予定です。午後の部では、NEDO 釘宮貴徳様より「水素社会実現に向けた NEDO の取り組み」についてご 講演いただきます。その後、民間企業の具体的な取り組みとして、JERA 高橋賢司様からは「ゼロエミッション火力の導入 に向けた取り組み」、INPEX 古座野洋志様からは「新潟県柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・利用一貫実証試験の概要」 についてご紹介いただく予定です。続いて JOGMEC 小杉安由美様からは最近世界的にも注目されつつある「天然水素の動 向、特にクリーンエネルギー資源としての可能性と課題」についてご紹介いただき、最後にクリーン燃料アンモニア組合 の村木茂様より「カーボンニュートラルに向けたアンモニアの役割」についてご講演いただく予定です。

以上のように本日の本講演会では官公庁,研究機関,団体,企業からの講演を通し,CCSとともに,水素,アンモニア 利用のさらなる社会実装に向けた,官民学によるさまざまな角度・視点からの具体的な取り組みを理解し,私たちが目指す 低炭素社会の方向性を模索する一助となるとともに,本日が皆様にとって有意義な一日になれば幸いでございます。

なお当協会の宣伝となりますが、来年2月にNEDOとJOGMECと共催し、石油技術協会主催の天然水素ワークショップ を開催する方向で調整を進めております。天然水素探査が先行する米国の最新動向を含む情報提供や国内研究者からの技術 的な講演やパネルディスカッションを通じて、天然水素に係る国内関係者の理解を深めるとともに、産官学の連携を図るこ とができればと考えております。後日、正式に決定した段階で当協会のホームページなどで改めてお知らせすることになり ますので、ふるってご参加いただきますようお願い申し上げます。

最後になりましたが、本日の講演会の開催に際し、講演者のみなさまとともに、ご協力いただいた全ての皆様に心から感 謝申し上げ、会長挨拶とさせていただきます。本日はどうぞよろしくお願い申し上げます。ありがとうございました。

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)39 ~ 44 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 39~44



水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援* ~グリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介~

本橋貴行***,*

(Received December 20, 2024; accepted March 11, 2025)

JOGMEC's financial support for hydrogen and ammonia projects – Introduction of project evaluation for e-fuel projects that utilize green hydrogen feedstock

Takayuki Motohashi

Abstract: Most of the "blue" and "green" hydrogen and fuel ammonia projects, as well as the production of synthetic fuels (e-fuel) from hydrogen, have not yet been on a commercial scale, and the industry itself has not yet been established. Therefore, the uncertainty of the business itself is higher than that of the oil and natural gas business, which has a history dating back to the beginning of the 20th century.

Amid growing interest from Japanese companies in participating in overseas decarbonization projects, in July 2024 JOGMEC decided to provide equity finance for Idemitsu Kosan's purchase of shares in HIF Global LLC, a U.S. company promoting e-fuel projects that utilize green hydrogen feedstock in the U.S. and other countries.

Since the company has a limited business track record, JOGMEC focused on the four items in their project evaluation, such as Management/Context/Opportunity/Risk & Control from the perspective of macro analysis with the comprehensive risk-based approach, in addition to the screening criteria for hydrogen and fuel ammonia production and storage that JOGMEC has announced.

Keywords: hydrogen, e-fuel, HIF Global LLC, macro analysis, Management/Context/Opportunity/Risk & Control

1. はじめに

JOGMECは、我が国の資源開発分野における政策実施 機関として、2004年の設立以降我が国企業による資源開 発事業への支援を実施してきた。2012年には石炭や地熱 資源開発への支援機能が追加され、またその後も国際的な 資源獲得競争が激化する中、石油・天然ガス分野や金属鉱 物分野でもその支援機能が強化された。

また,2015年の第21回気候変動枠組条約締結国会議 (COP21,パリ協定)を契機に世界各国が温暖化ガス排出 量の削減強化・燃料の脱炭素化に向かう一方,我が国をは じめ各国では,エネルギーセキュリティの強化が主要な 政策課題となった。我が国におけるこうした課題の解決 に貢献するため、2022 年 6 月に JOGMEC 法が改正され、 JOGMEC の支援対象が水素などの製造や CCS 分野に広が り、JOGMEC の名称も「石油天然ガス・鉱物資源機構」 から「エネルギー・金属鉱物資源機構」に変更された。

筆者が部長を務めるエネルギー開発金融部は,JOGMEC エネルギー事業本部に所属し石油・天然ガスの探鉱開発, および水素などの製造,CCS事業(CO₂の貯蔵および貯 蔵に必要な探査)に対する出資・債務保証による支援を担 当する。水素などの製造やCCS事業においても,石油・ 天然ガスプロジェクトの支援を通じて培った技術および非 技術分野の事業評価の経験を活用し,アシュアランスと コンサルテーション業務を推進している。本稿は,2024 年7月にJOGMECが出資対象事業として採択した米国の 合成燃料製造事業者である HIF Global LLC に関して,ど のような観点から事業評価を実施したか,その取り組みを 紹介する。

2. グリーン水素を原料とする合成燃料事業

現在世界で計画されている「ブルー」水素・「グリーン」 水素や燃料アンモニアの製造事業,またこれら水素を原料

^{*} 令和 6 年 11 月 12 日, 令和 6 年度秋季講演会「低炭素エネルギーシステ ムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 This paper was presented at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{***} エネルギー・金属鉱物資源機構(Japan organization for Metals and Energy Security: JOGMEC)

^{*} Corresponding author : E-Mail : motohashi-takayuki@jogmec.go.jp

とする合成燃料(e-fuel)の製造事業は、商業規模の事業 化に至った実績が乏しく、この分野の産業自体が未成立で ある。このため20世紀初頭からの歴史を有する石油・天 然ガス分野の事業と比較して、事業自体の不確実性が高い といえる。

本稿で扱う合成燃料とは、グリーン水素と二酸化炭素 を原料として製造される液体燃料である。FT (Fischer-Tropsch)合成やメタノール合成を通じて合成燃料として製 造される e ガソリンや e ディーゼルは、従来の化石燃料と 同程度のエネルギー密度を有するうえ、「ブルー」水素・「グ リーン」水素や燃料アンモニアとは異なり、既存のインフ ラ (タンクローリーや貯蔵施設など)を新設・改修するこ となく利用でき、同様に既存の船舶・自動車などの内燃機 関にそのままで活用できることがメリットである。

2.1 合成燃料事業の比較優位性

水素や燃料アンモニアなどの低炭素燃料は,電解槽など の製造設備や水素の原料の1つである二酸化炭素の確保を 含め製造面でのコストが高価なこと,大規模化が困難なこ とから最終製品価格は高価なものとなる。需要側にとって みれば,水素・アンモニアの運搬インフラや火力発電所な どの設備・装置などの更新のための投資が必要となる。こ のため,水素や燃料アンモニアが普及するためには,各国 の規制あるいは各国政府補助金などによる需要創出に大き く頼らざるを得ない。

一方でグリーン水素を原料とする合成燃料製造事業に要 する技術は、スケールアップに課題が残っているものの、 個別にはすでに実証された技術である。また合成燃料は、 水素や燃料アンモニアとは異なり既存設備の活用が可能な 「ドロップイン燃料」であること、また製造プロセスを変 えることで, e メタンから e ガソリン, e ディーゼルなど, 用途に応じた合成燃料を製造することも比較的容易である ことから,早い社会実装が期待される。

2.2 世界の合成燃料製造プロジェクト

太陽光や風力発電など由来の再生可能エネルギーを用 い、水を電気分解することで生成した「グリーン」水素 を原料とする主な合成燃料製造プロジェクトとして、2022 年にみずほリサーチ&テクノロジーズが実施した調査では 20 件以上が紹介されている。これらは電解槽で水素を製 造,石炭火力発電を含む産業分野から二酸化炭素を調達し, 合成燃料(eガソリン, eディーゼル, eSAF および e メタ ノール)を製造する事業である。図1に示すように、グ リーン水素を原料とする合成燃料製造プロジェクトは主に FT 合成法 (Fischer-Tropsch process), メタノール合成法 (methanol synthesis) の2種類があり、この他に植物由来 のエタノールから触媒反応によって eSAF を製造する ATI 法 (Alcohol to JET process) などがある。欧州で計画され る合成燃料製造事業はFT 合成法によるものが多くを占め る。一方中国、豪州および南米では主としてメタノール合 成法により計画されたプロジェクトが多い。

なお本稿の対象とする HIF Global LLC は、米国テキサ ス州、チリ、ウルグアイ、タスマニア他においてグリーン 水素を原料としたメタノール合成法により、e メタノール およびこれを改質した合成燃料の製造を計画している。

シンガポールの Gena Solutions は、グリーン水素を原料 とした e メタノールと植物など由来のバイオガスを活用し たバイオメタノールの世界全体の製造能力の合計は、2023 年の 60 万トン(ほとんどがバイオメタノール)から 2030 年までに 3180 万トンに増加すると予測している(うち e



図1 主な合成燃料製造プロジェクト(みずほリサーチ&テクノロジーズ, 2023)

メタノール 1870 万トン, バイオメタノール 1310 万トン)。 このうち,特に e メタノールの製造能力は中国を中心に 増加することが予想されており,2030 年の合計生産能力 3180 万トンのうち,約 50%の 1600 万トンを中国が占める と予測している。

2.3 合成燃料製造プロジェクトの事業者

これまで JOGMEC が対象にしてきた石油・天然ガス探 鉱開発事業は、我が国企業がオペレーターである事業を除 けば、産油ガス国の国営石油会社や、欧米メジャーあるい はメジャーに次ぎ事業実績のある外国企業などが主たる事 業者である。他方「グリーン」水素・「ブルー」水素を原 料とする合成燃料製造プロジェクトを計画する企業には、 事業実績や財務能力が限定的な、いわゆるスタートアップ 企業やベンチャー企業が多いことが特徴として挙げられ る。またグリーン水素や合成燃料製造に係る技術力に着目 しても、独自に技術開発を行う企業もあれば、既存の汎用 技術を融合して大規模化を図ることを前提とするビジネス モデルの企業もある。もちろん欧米の石油メジャーや化学 品分野の他、パイプラインやターミナル操業を行うインフ ラ関連企業、洋上風力分野で事業経験を有する企業が主導 する合成燃料製造事業もある。

他方で我が国において合成燃料が普及するためには、製 造・導入のコストをいかに引き下げるかが課題である。図 3のとおり、経済産業省は1リットル当たりの合成燃料の 製造コストについて、水素を含み国内製造した場合、海外 で製造した水素を国内に輸入し合成燃料を製造した場合, 合成燃料を海外で製造し輸入した場合に分け、それぞれ約 700円,約350円,約300円と試算している。現状では、 このような高いレベルの製造・導入コストをいかに低減で きるかどうか、また、それに伴う需要先を確保できるかど うかが課題である。このため、特に海外の合成燃料製造プ ロジェクトの事業者は、航空・海運産業や国レベルでの脱 炭素燃料導入に係る規制の動向に留意しつつ、原料となる 水・二酸化炭素の長期安定的確保、グリーン水素製造技術 や合成・改質技術の高度化、長期・安定的な需要家の確保、 事業実施国の合成燃料製造に係るインセンティブ導入など を最終投資判断の条件としている。

3. 米 HIF Global LLC の事業評価

海外の脱炭素事業への参画に対する我が国企業の関心が 高まる中,2024年7月にJOGMECは、米国および複数の国・ 地域でグリーン水素を原料とする合成燃料製造プロジェク



図2 e メタノールの生産能力の予測(Gena Solutions、2024)



図3 合成燃料の製造コスト(経済産業省のデータを基に JOGMEC 作成)

トを計画・推進する米 HIF Global LLC への出光興産株式 会社(以下「出光興産」)の一部株式取得を出資対象事業 として採択した。これは、HIF Global LLC が合成燃料プロ ジェクトの開発等資金の新規調達を目的として行う同社株 式の新規発行に関し、JOGMEC は出光興産とともに出光 興産の米国子会社である Idemitsu Efuels America Corp. を 通じて、当該株式の一部取得を行うものであった。

3.1 HIF Global LLC

出資先である HIF Global LLC は、2016 年にチリの大 手発電・エネルギー会社である Andes Mining & Energy Corporate S.A.(以下「AME」)により設立された。AME は新たな事業領域進出の一環として、チリの再生可能エネ ルギーのポテンシャルを活用し、風力発電由来のグリー ン水素を原料とした合成燃料製造プロジェクトを推進し た。2022 年にはチリのマガジャネス州にてハルオニ(Haru Oni)合成燃料製造実証プラントの操業開始に至り、同プ ラントで製造された e メタノールを改質した e ガソリンを 生産中である。同社は、現在世界 4 か国(米国、豪州、チリ、 ウルグアイ)で大規模な e メタノールおよび合成燃料製造 事業を計画しており、将来、各国のプラントから e メタノー ル換算で年間 400 万トンの生産を行う計画である。このよ うに同社は大規模な合成燃料製造プラントを世界で展開す ることで早期に e メタノールの製造を始め, e ガソリンな どの生産を拡大し, 合成燃料の市場シェアを確保すること を戦略としている。同社は米国事業で140万トンの e メタ ノールの生産能力獲得を計画しているが, 2030年までに これが実現されれば, 同社の米国事業は2030年の世界の e メタノール生産能力1870万トン(図2)の約7%を占め る規模となる。

なお出光興産は米国・豪州における HIF Global 社の事 業から e メタノールまたはその他の合成燃料を我が国へ持 ち込むことを計画しており, HIF Global LLC への出資を通 して我が国内外における e メタノールを含む合成燃料のサ プライチェーン構築を目指している。

3.2 マクロ分析の視点を含めた事業評価

今般の合成燃料製造プロジェクトの事業評価に際して JOGMECは、自身が公表している水素などの製造および 貯蔵に係る採択審査基準の他に、マクロ分析の観点から Management/Context/Opportunity/Risk & Control の4項目 に着目した事業評価を行った。

これまで述べてきたように、合成燃料製造プロジェクト の推進者は事業実績や財務能力が限定的なスタートアップ 企業などが多い。HIF Global LLC は、チリ有数の大企業で ある AME や独自動車メーカーなどが株主であるが、同社



図4 マクロ分析の視点 (Management/ Context / Opportunity/Risk & Control)

もスタートアップ企業の域を出ない。合成燃料製造事業は いまだ黎明期の産業分野であり事業自体の不確実性は高い といえる。また、同社はチリで実証プラントを操業中とは いえ事業実績が乏しいため、同社が計画する事業の評価に 際しては、公表済みの採択審査基準だけではなく、同社が 計画する事業の全体像を俯瞰するため、マクロ分析の観点 から上記4項目も含めて包括的なリスクベースドアプロー チ(森、2018)による評価を行った。4項目の評価の視点 および具体的な内容は以下のとおり(図4)。

(1) Management

(視点)

新しい事業(ブルー / グリーン水素・燃料アンモニ ア,合成燃料の製造)を実施する事業者の経験,実 施能力はどうか。レジリエンス(軌道修正能力)は あるか。

(HIF Global LLC の事業評価における着目点)

同社策定の事業計画の確度,事業実施体制。:マネー ジメントチームのコミットメント,事業経験,技術 力,財務能力など

(2) Context

(視点)

アイデアが具体的事業に昇華するために、その背景 となる我が国および各国(事業実施国、需要国)の 政策・産業育成策はどうか。気候変動問題に対する 我が国・各国(同上)の政治・社会の動向はどうか。 今後どうなると予想されるか。

(HIF Global LLC の事業評価における着目点) 同社策定の事業計画の確度および環境適合性。:各 国(同上)の法制度,許認可プロセス,環境規制。 補助金などのインセンティブ,事業実施国の製造に 係るインフラ整備状況,需要国(販売先)の需要見 通し,輸送手段など

(3) Opportunity

(視点)

新しい事業における固有の機会は何か。「持続可能」, 「魅力的」か。「競争力」,「柔軟性」は有しているか。 (HIF Global LLC の事業評価における着目点) 原材料の安定共有,事業拡張性,環境適合性,経 済性。:原材料調達に係る代替可能性,技術の成熟 度,需要者側(顧客)のコミット・契約条件,事業 経済性

(4) Risk & Control

(視点)

新しい事業が包含すると考えられるリスクは何か。 またそのコントロールは可能か。具体的なコント ロール手段は何か。

(HIF Global LLC の事業評価における着目点) 同社策定の事業計画の確度,リスク分担の妥当性。: 各国(同上)の政治経済リスク,原料および電力調 達のリスク,事業者の実施能力・需要者側の購買能 力,製造プラント建設リスク(コスト上昇含む)

4. 今般の事業評価における考察

JOGMEC は HIF Global LLC の一部株式取得について, 採択審査基準とともにマクロ分析の視点から事業評価を行 い出資対象事業として採択を実施した。JOGMEC は出光 興産とともに出資先である HIF Global LLC の事業進捗状 況につきモニターを継続している。

4.1 課題と機会

「グリーン」水素・燃料アンモニア製造事業は、スケー ルアップや建設コスト、需要家側のコミットなど、LNG プロジェクトと共通する事業リスクが認識される一方で、 グリーン水素製造のための原料や電力調達、電解槽に関す る技術リスクなど特有のリスクも存在する。また石油開発 事業では、原油などの生産物の販売についてのリスクは小 さいが、合成燃料製造事業については、その製品市場はほ ぼ皆無であり、製造設備の建設など、事業実施に必要な資 金調達が円滑に進むかという点も大きな懸念である。

また 2.2 節のとおり,水素などの製造事業は産業黎明期 にあり,石油・天然ガス開発事業のような成熟産業のプレー ヤーとは異なるスタートアップ企業なども多く参加する。 これら企業における事業遂行の蓋然性の評価や,計画どお り進まない場合のオプションの有無など,特に留意しなけ ればならない点も多い。一方では,規模が小さいが小回り の利く企業であるからこそ,以下のような「機会」を気付 かせてくれることもある。

- (1) スタートアップ企業やベンチャー企業の中には、先進的な技術開発に長け、小規模な事業から段階的な事業拡大を志向する企業がある一方、HIF Global LLC のように、汎用技術を活用し当初から大規模事業を目指す企業もある。このように企業にとって異なる戦略を有し、その結果多様なビジネスモデルを認識できる。
- (2) スタートアップ企業特有の資金調達スキーム。これ らの企業の中では社債を資金調達の中心に置くこと も多く、これら企業への新規参画に当たっては企業 のニーズに応じた柔軟な資金供給スキームが求めら れる。

5. 今後に向けて

今後も燃料の脱炭素化の潮流は変わらないと見られる が、世界で計画されている「グリーン」水素・「ブルー」 水素等分野のプロジェクトのうち、最終的に投資決定 に至る案件は淘汰されてゆく。同時に我が国企業から JOGMEC に支援要請が寄せられる案件も、より事業実現 性の高い案件が中心になると考えられ、この中には合成燃 料製造事業以外にも液化水素や燃料アンモニアの製造、貯 蔵事業の支援要請も想定される。

今回の HIF Global LLC の事業評価を通じ,水素・燃料 アンモニアおよび合成燃料の製造事業に係る事業評価にお いては,評価手法の継続的な見直しと改善が重要である ことを感じた。このため当部は,HIF Global LLC の事業進

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

44 水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援~グリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介~

捗を仔細にモニターし、当初認識していたリスクが妥当で あったかどうか確認するとともに、同時に将来発生するリ スクを早期に把握しその対処方法を検討できる構えを作っ てゆきたい。

また今後は、合成燃料製造事業だけではなく水素・燃料 アンモニア事業への支援要請が増えることに備え、従来の 石油・天然ガス開発事業と異なるリスクは何か、一方でこ れら新たな事業の機会はどこにあるのかを見極める感度を 高めてゆきたい。

JOGMECとしては、こうした取り組みを継続し、事業の実現可能性が高く、かつ我が国の合成燃料を含む低炭素 燃料のサプライチェーン構築に貢献する可能性の高い案件 を取りこぼさないため、適切な事業評価を実施できる体制 を強化したい。

また,水素・燃料アンモニアおよび合成燃料製造事業の 事業評価の手法は,従来の石油・天然ガス事業の事業評価 にもフィードバック可能であり,また CCS 事業の事業評 価にも活用が可能であると考えられる。 JOGMEC は事業評価のノウハウを蓄積し,新たな事業 とともに従来の石油・天然ガス探鉱開発事業の評価スキル を向上させ,政策当局および我が国企業へのコンサルテー ション機能を高めて参りたい。

引用文献

- みずほリサーチ&テクノロジーズ,2023: 令和4年度燃料 安定供給対策に関する調査事業(合成燃料の導入及び 活用拡大に向けた検討事業)調査報告書,https://www. meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000080.pdf (accessed: 2024/12/20).
- Gena Solutions, 2024: Renewable methanol update (November 2024), https://www.genasolutions.com/ analysis_and_insights/26 (accessed: 2024/12/20).
- 森 裕之, 2018:資源開発事業評価におけるリスクベース ドアプローチと経済性評価. 石技誌, 83(1), 77-80, doi: https://doi.org/10.3720.jpat.83.77.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)45 ~ 49 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 45~49

講	演
Lect	ure

ゼロエミッション火力の導入に向けた取り組み*

高橋賢司**,*

(Received December 23, 2024; accepted March 7, 2025)

Initiatives toward the introduction of zero-emission thermal power plants

Kenji Takahashi

Abstract: To achieve zero-emission by 2050, JERA believes that the appropriate approach to achieve both decarbonization and a stable supply of electricity is to expand the introduction of renewable energy and to convert fuel of thermal power that can complement the output fluctuations to reduce CO_2 emission.

Therefore, JERA is actively working on the development of hydrogen and ammonia-related technologies for the introduction of zero-emission thermal power plants, along with the expansion of renewable energy.

In 2024, JERA and IHI Corporation conducted the world's first demonstration test of 20% fuel ammonia conversion at a large-scale commercial coal-fired power plant at the Hekinan Thermal Power Plant with the support by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

The test results were good, and 20% conversion of ammonia was achieved at the rated output of 1000 MW as planned. Compared to 100% coal combustion, volume of CO_2 and SOx was reduced by 20%, NOx was less than the same, and no generation of N_2O was confirmed.

In the future, JERA will continue to work toward commercial operation of ammonia-fired power plants and develop technologies to expand conversion rate or 100% combustion of hydrogen and ammonia.

JERA will lead the establishment of a hydrogen and ammonia supply chain by utilizing the know-how that JERA has gained from participating in entire value chains from fuel upstream to power generation toward the realization of a hydrogen society.

Furthermore, by leveraging the large-scale demand of hydrogen and ammonia as a power generation fuel and developing the infrastructure for hydrogen and ammonia, JERA and its partners will work to expand the supply chain, including promoting its use in industries.

Keywords : JERA, zero-emission, hydrogen, ammonia, conversion, demonstration test, Hekinan, thermal power, NEDO, IHI, carbon neutral

1. はじめに

当社は、2015年4月に東京電力と中部電力の共同出資 により設立され、以降、両社の燃料・発電事業の統合を段 階的に進め、2019年4月に燃料の上流・調達から発電、 電力・ガス販売に至るバリューチェーン全体の統合を完了 した。世界のエネルギー問題に最先端のソリューションを 提供することをミッションとして掲げ、再生可能エネル

Copyright © 2025, JAPT

ギーと低炭素火力の組み合わせにより安定供給・経済性・ 脱炭素の同時実現を目指している。

2. JERA ゼロエミッション 2050

当社は、2020年10月、国内のエネルギー事業者として いち早く2050年における国内外の当社事業から排出する CO₂の実質ゼロを目指す環境ビジョン「JERA ゼロエミッ ション2050」を公表した(JERA, 2020)。

「JERA ゼロエミッション 2050」の実現のためのアプロー チは、以下の3つである。

 再生可能エネルギーとゼロエミッション火力の相互 補完

太陽光や風力などの再生可能エネルギーは,自然条件により出力が変動する。近年,再生可能エネル ギーの導入拡大に伴い,出力変動幅は増大しており,

^{*} 令和 6 年 11 月 12 日, 令和 6 年度秋季講演会「低炭素エネルギー システムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 This paper was presented at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system: Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{** ㈱} JERA 企画統括部 脱炭素推進室 JERA Co.,Inc. Planning division Decarbonization promotion section

その変動を吸収し,需給バランスを調整する機能(調 整力)を有する火力電源が,電力の安定供給に大き く貢献している(図1)。

当社は、再生可能エネルギーの導入拡大と併せ、そ の出力変動を補完できる火力電源をゼロエミッショ ン化していくことが、電力安定供給と脱炭素化を両 立する適切なアプローチだと考えている。

- ② 国・地域に最適なロードマップの策定 国・地域ごとに、電力・燃料供給インフラの成熟度 や電力需要の伸び、地理的条件に応じた導入可能な 再生可能エネルギーの種類・量は異なる。そのため、 ゼロエミッション実現のための最適なソリューショ ンも国・地域ごとで異なってくる。 当社は、アジアをはじめとする海外のステークホル ダーとコミュニケーションを図りながら、国・地域 単位のロードマップの策定を支援している(図 2)。 引き続き、策定したロードマップ実現に向けた具体 的な協業開始や、取り組み拡大を目指す。
- ③ スマート・トランジションの採用 ゼロエミッションは、施策の導入決定する段階において、イノベーションにより利用可能となった信頼

のおける技術を組み合わせること(スマート・ト ランジション)で実現する。これにより,迅速かつ 着実に,低い技術リスクでグリーン社会への移行を 促していく。

上記の考え方のもと、当社は国内事業を対象として、 2050 年 CO₂ ゼロエミッションまでの道筋を示した日本版 ロードマップ(図3)を策定した。このロードマップでは、 再生可能エネルギーを最大限導入しつつ、火力発電所にお ける水素・アンモニア転換の拡大を目指す。なお、本ロー ドマップは脱炭素技術の進展,経済合理性、政策との整合 性を前提としており、今後これらの前条件を踏まえて段階 的にアップデートしていく。

3. ゼロエミッション火力実現に向けた取り組み

当社は、さまざまな企業などと協力しつつ、NEDO の助成事業・GI 基金などの枠組みを活用してゼロエミッ ション火力導入および水素・アンモニアサプライチェーン 構築に向けた技術開発を進めている。

次世代のクリーンエネルギーとして期待される水素は, キャリアへの変換を行わずに水素ガスのまま利用すること が理想だが,長距離輸送・大規模貯蔵が難しい。アンモニ



※日本は山間部が多く、太陽光発電は設置の適地不足、洋上風力発電は、海が深い、台風多発等により、稼働までに時間がかかるという課題がある。平地面積あたりの日本の太陽光発電導入容量は世界の主要国の中でも最大。

図1 ゼロエミッション火力による再生可能エネルギーの補完



図2 アジアへの脱炭素ロードマップ策定支援

「JERAゼロエミッション2050」日本版ロードマップ

- 非効率石炭停廃止/石炭・LNGからアンモニア・水素への転換/再エネの導入により、日本国内事業のネットゼロに挑戦。
- ゼロエミッションへの道筋は、国・地域の状況に応じて異なる。最適なロードマップを海外にも順次展開。



図3 JERA ゼロエミッション 2050 日本版ロードマップ



図4 碧南火力発電所

アは、海上輸送などの長距離輸送・大規模貯蔵の技術が確 立している水素キャリアかつ、直接燃焼が可能である。そ のため海上輸送したアンモニアを燃料として燃焼させて石 炭を転換できれば、エネルギーロスを抑えつつ、大きな CO₂削減効果を得られる。当社はアンモニアを発電燃料と して利用することを検討、取り組みを進めてきた。

3.1 碧南火力発電所におけるアンモニア 20%転換実証 試験

2024 年, 碧南火力発電所において㈱ IHI と共同で, 新 エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の支援を受 けつつ (NEDO, 2024),世界初となる大型商用石炭火力実 機での燃料アンモニア 20%転換実証試験を実施した。

試験対象プラントは、共同研究者のIHI納入石炭燃焼ボ イラであり、バーナ改造工事を定期点検と同調して行うこ とが可能な碧南火力発電所4号機(図4)とした。

試験の実施にあたっては、燃料アンモニアを受け入れる ためローディングアーム・受入配管・タンク・気化設備・ 送ガス管を新設した。また、アンモニア燃焼が可能となる よう既存バーナへアンモニアノズルを追設する改造を行っ た。実証試験設備の概要を図5に示す。

アンモニア受入設備については、桟橋の新設は行わず既 設石炭桟橋にアンモニア荷役用のローディングアームを設 置した。加えて、アンモニア消費に合わせてアンモニア輸 送船から荷役を行うことでアンモニアタンク容量を最小化 した。これらを含む設備の詳細設計により、工期の1年短 縮とコスト削減を実現した。また、バーナ改造は、定期点



図5 実証試験設備概要

検内で実施することでユニット停止期間を最小化し、電力 安定供給を維持しつつ実施した。建設工事の概略工程を図 6に示す。

試験スケジュールを図7示す。試験の結果は良好であ り、計画どおり定格出力100万kWでのアンモニア20% 転換を達成した。アンモニア転換前(石炭専焼)と比較し、 CO₂およびSOxは20%削減,NOxは同等以下であり温室 効果の強いN₂Oの発生は確認されなかった。

当社は、本実証を通じてアンモニアへの燃料転換は社会

実装に向けて利用可能な技術であることを確認した。今後は、商用化に向けた取り組みを進めるとともに、50%以上 転換実証など水素・アンモニアの転換拡大・専焼化実現に 向けた技術開発を進めていく。

3.2 水素・アンモニアサプライチェーンの構築と拡大

ゼロエミッション火力導入を含めた水素社会の実現に は、水素・アンモニアを安定的に調達するためのサプライ チェーン構築・拡大が不可欠である。当社は、これまで燃料・ 発電の一連のバリューチェーンに事業参画してきたノウハ



図6 実証試験工事概略工程



図7 実証試験工程

水素・アンモニアサプライチェーン



図8 水素・アンモニアサプライチェーン



© JERA Co., Inc. All Rights Reserved

図9 水素アンモニアサプライチェーンイメージ(中部圏水素・アンモニア社会実装推進会議, 2024)

ウを生かすことで、国内外の企業と連携しつつ水素・アン モニアサプライチェーン(図8)の構築を目指している。

発電燃料としての水素・アンモニアは、早期に長期間・ 大規模な需要が見込まれ、その大規模需要をてこにインフ ラを整備することで、発電以外の産業への利用・普及が期 待できる。例えば、中部地域の中部圏水素・アンモニア社 会実装推進会議では、当社火力発電所でのアンモニアの大 規模利用と発電以外の産業への利活用を組み合わせたサプ ライチェーンモデル(図9)の構築に、官民が連携して取 り組みを進めている。

政府は、水素などの普及拡大に向けて、2024年5月に 成立した水素社会推進法に基づく支援(水素などの供給 インフラ形成支援,水素・アンモニアと既存燃料との価格 差に着目した支援)を行うこととしている。当社は、本支 援などを通じ水素サプライチェーンの構築および地域の脱 炭素化に貢献していく。さらには、アジアなどの海外にも 脱炭素ソリューションを展開し、サプライチェーンの強靭 化を図っていく。

4. まとめ

これまで当社のゼロエミッション火力実現に向けた取り

組みを紹介してきた。その実現には、今後の脱炭素技術の 革新や事業予見性確保のための政策的支援などによるとこ ろも大きく、業界の垣根を越えた多種多様なパートナーと の連携や協働が必要不可欠となる。当社は、さまざまなス テークホルダーと協力しながら、今後も率先して脱炭素化 に向けた課題解決に取り組み、グローバルレベルでの持続 可能な社会の実現をリードしていく考えである。

引用文献

- JERA, 2020:2050年におけるゼロエミッションへの挑 戦について、https://www.jera.co.jp/news/information/ 20201013_539 (accessed 2025/1/23).
- NEDO, 2024:カーボンリサイクル・次世代火力発電等技 術開発 (JPNP16002),アンモニア混焼火力発電技術研 究開発, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100115. html (accessed 2025/1/23).
- 中部圏水素・アンモニア社会実装推進会議,2024:水素 ・アンモニアサプライチェーン構築に向けて,https:// www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/522732.pdf (accessed 2025/1/23).

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)50 ~ 54 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 50~54



新潟県柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・利用一貫実証試験の概要*

古座野 洋 志***,*

(Received January 8, 2025; accepted March 21, 2025)

Overview of the Kashiwazaki Clean Hydrogen and Ammonia Project in Niigata Prefecture

Hiroshi Kozano

Abstract : Ammonia, despite being a hazardous substance, serves as a feedstock for fertilizers, chemicals, and deNOx processes in thermal power plants, with established handling and storage methods. In the pursuit of a decarbonized society, reducing carbon emissions across various industries, including power generation and transportation, has gained momentum. Ammonia as a fuel, noted for its non-CO₂ emitting combustion, is a promising option, particularly in reducing CO₂ emissions when co-fired with coal in thermal power plants.

Currently, ammonia is primarily produced from natural gas using a steam methene reforming (SMR) process combined with the Haber-Bosch method, which emits CO_2 . Hence, developing and cost-reducing production technologies for blue ammonia is imperative.

The ammonia production process from natural gas has been highly optimized by process licensors, yet integrating CCS for decarbonization presents several challenges. INPEX has proposed a novel process combining cold energy utilization, ATR process, low-pressure ammonia synthesis, and high-pressure CO₂ recovery, demonstrating higher efficiency in blue ammonia production compared to conventional methods.

A small-scale yet comprehensive demonstration plan for this blue ammonia production process has been devised. The test site selected is the Hirai area in Kashiwazaki City, Niigata Prefecture, owing to the proximity to our pipeline and the availability of domestically sourced natural gas. Additionally, the site benefits from existing gas fields with long-term production data and known reservoir characteristics suitable for CO_2 injection.

This demonstration involves producing hydrogen from natural gas, capturing and compressing the resultant CO_2 , and injecting it into the Higashi-Kashiwazaki gas field. The blue hydrogen will then be used for ammonia production and power generation, representing an integrated demonstration from blue hydrogen production to its application.

This trial is positioned as a critical initiative towards fulfilling our company's long-term goals in hydrogen and CCUS sectors.

Keywords : blue hydrogen, blue ammonia, low-pressure ammonia synthesis, EGR, CCUS, Higashi-Kashiwazaki gas field

1. はじめに

アンモニアは劇物であるが,肥料・化学品の原料や火力 発電所での脱硝用途などに利用されており,その運搬や保 管など取り扱い方法についても確立されている。脱炭素社 会の実現を目指すにあたり、電力や運輸を含むあらゆる産 業において低炭素化に向けた動きが進められているが、燃 焼時に CO₂を排出しないアンモニアの燃料としての利用 についてもその有力な手段の1つと認識されており、特に 石炭火力発電におけるアンモニア混焼による CO₂ 排出削 減効果が注目されている。

一方で,現在のところアンモニアは天然ガスを原料として水蒸気改質法とハーバー・ボッシュ法を組み合わせて製造されており,製造時に CO₂を排出している。このため現状の製造プロセスに CCUS などによる CO₂の処理を追加したブルーアンモニアや再生可能エネルギーを利用したグリーンアンモニアの製造技術の開発とその低コスト化が課題である。

^{*} 令和6年11月12日, 令和6年度秋季講演会「低炭素エネルギー システムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 TThis paper was presented at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system: Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{**} 株式会社 INPEX 水素・CCUS 事業開発本部 技術開発ユニット Technical Development and Coordination Unit, Hydrogen & CCUS Development Division, INPEX Corporation

[†] Corresponding author : E-Mail : hiroshi.kozano@inpex.co.jp

本講演では、天然ガスからのアンモニア製造においてす でに最適化されているプロセスに CCS プロセスを追加す る場合に想定される問題点とその解決策を提示したうえ で、その有効性の確認を主目的の1つとして新潟県柏崎市 で計画を進めているブルー水素・アンモニア製造・利用一 環実証試験の概要について紹介する。

2. ブルーアンモニアの製造プロセスの課題 と解決策

天然ガスからのアンモニア製造プロセスはプロセスライ センサーにより開発され,高度に最適化されており,そこ に CCS などを組み合わせて脱炭素化を図る際には種々の 課題がある。

図1に一般的なアンモニア製造プロセスに CCS のため の工程を追加した場合のフロー図を示す(従来法)。水素 の製造工程は steam methene reforming (SMR) による一 次改質炉と auto thermal reforming (ATR) による二次改質 炉からなり、まず SMR にて粗く改質した後、ATR に供給 する構成となっている。SMR においては、改質反応を進 行させるために外部からの熱供給が必要であり、その際に 燃焼排ガスの形で CO2 が発生する。当社の検討によると、 この燃焼排ガスから全体の約3割のCO。が発生すること になるため、プロセスガス中の CO。を対象とした CCS だ けでは十分に炭素強度を十分に下げることができない。 方で低圧かつ低 CO2 濃度の燃焼排ガスからの CO2 回収お よび昇圧には大きなエネルギーを要する。一方でアンモニ ア製造プロセス全体のヒートインテグレーションは、各プ ロセスライセンサーにより最適化され、熱効率を高められ ており、新たに必要となるエネルギーの増加はそのまま燃

料として使用する天然ガス量の増加につながり,結果ブ ルーアンモニア製造コストの増加につながる。

当社は 2021 年に国立研究開発法人新エネルギー・産業 技術総合開発機構(以下 NEDO)から、「カーボンリサイ クル・次世代火力発電等技術開発/次世代火力発電技術推 進事業/ブルーアンモニア製造技術に関する実現性検討」 の調査事業を受託し、前述の問題点を解決することを目標 に、新たな製造プロセスの検討を行った。この検討にお いて、冷熱の利用、ATR のみによる水素製造、低温・低 圧アンモニア合成、CO₂ 高圧回収という4つの要素技術 を組み合わせたプロセス(提案法)を評価した(NEDO, 2022)。

提案法のフロー図は図2のとおりであるが、前述のとお り4つの要素技術の組み合わせに特徴がある。1つ目の要 素である冷熱については、アンモニアの液化工程や空気分 離工程の冷媒として利用することで、これらの工程の動力 を削減することが可能となる。2つ目の要素は水素製造工 程を ATR のみとすることである。これにより CO2 の主要 な発生源をプロセスガスに限定することが可能となり、燃 焼排ガスからの CO2 回収を避けることが可能となる。ATR のみで水素を製造する場合には、空気ではなく酸素を使用 することが必要となるが、前述のとおり冷熱の利用により 空気分離に要するエネルギー削減が可能である。3つ目の 要素は低圧アンモニア合成である。アンモニア合成に一 般的に用いられているハーバー・ボッシュ法では15~30 MPa という高圧でアンモニアを合成しているのに対し, 近年国内で5~8 MPaという圧力でアンモニア合成を進 めることができる触媒が開発された。この触媒を使用した プロセスを用いることで、原料の昇圧に必要な動力の削減



図1 既存のアンモニア製造方法に CCS を追加する場合のフロー図

を図ることが可能となる。一方で低圧化により液化工程に より多くの動力を必要とすることになるが,前段で述べた 冷熱の利用によりこの欠点を補うことができる。最後の要 素は高圧 CO₂ 回収である。熱に強いアミン溶液を利用す ることで,アミン溶液の再生温度を従来よりも高めること ができ,より高圧でのアミン溶液の再生および CO₂ の回 収が可能となる。高圧で CO₂ を回収することで,貯留層 にCO₂を圧入する際に必要となる動力の削減が可能となる。

以上, 述べた4つの要素技術を組み合わせることにより, 従来法との比較において,アンモニア製造コストを8~ 10%程度することが可能という結果を得た。

・柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・ 利用ー環実証試験

前節で述べた提案法を小規模ながら最大限実証する試験 を新潟県柏崎市の当社がかつて天然ガスの生産を行ってい た平井ガス採収所とそれに隣接するエリアにて実施中であ る(図3)。このサイトを選定した理由としては、当社の 天然ガスパイプラインがサイト近傍に位置しており原料と なる天然ガスの調達が容易なこと、天然ガスの生産を通じ て貯留層性状を把握している東柏崎ガス田を回収した CO₂ の圧入先として利用できることがあげられる。

本実証試験のシステム概念図を図4に、実証プラントの



図2 高効率ブルーアンモニア製造法のフロー図



図3 新潟県柏崎市での実証試験実施場所



図4 実証試験のシステム概念図



- ✓ ATR/高圧CO2回収(HiPACT)/低圧アンモニア合成(つばめBHB)を採用
 - 小規模実証ならではの問題点あり大規模化を想定した提案法から以下の点を変更

 - 深冷空気分離の採用は規模の観点から難しいため、酸素、窒素は液体として受け入れる LNGは入手不可のため、アンモニア合成の液化冷媒には原料の液体窒素を一部用いる 小型ATRはライセンサーの既存設備の設計情報を転用するため、圧力が提案法より低い(6.5→4.5 MPa)
 - 小規模では放熱が大きく、また複雑な熱インテグレーションは難しいため、別途ボイラーを利用する

図5 実証プラントのプロセスフロー図

プロセスフローを図5に示す。プラント構成は基本的に提 案法と同様であるが、小規模での実証という制約から、次 の点が提案法と異なる点である。

- ・深冷空気分離の適用は規模の観点から難しく酸素およ
 び窒素は液体として受け入れる
- ・LNG 受け入れ設備が近傍に存在しないため、冷熱の 利用という観点では、アンモニア合成工程での液化冷 媒には原料の液体窒素を用いる
- ライセンサーの既存設備の設計情報を転用するため、 ATR の運転圧力は提案法よりも低い
- 小規模では放熱が大きいこと、複雑な熱インテグレー ションは難しいためボイラーを利用する

提案法の特徴として挙げている4要素のうち、冷熱の利 用については一部を取り入れるにとどまるが, ATRの利用, 低圧アンモニア合成および高圧 CO₂ 回収については、ほ



図6 実証設備の完成予想図

ぼそのままの形で取り入れたプラントである。実証設備の 完成予想図を図6に示す。

次にCO2圧入対象となる東柏崎ガス田について述べる。

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)



図7 実証試験での Subsurface 関連スコープ

東柏崎ガス田は 1970 年に生産を開始したガス田であり, 深度約 2500 m に位置するグリーンタフと呼ばれる火山岩 からなる貯留層である。このガス田は中通地区と平井地区 に分かれているが,今回の圧入対象は平井地区である。平 井地区には5本の生産井が掘削され,最盛期には約 50 万 Nm³/d の生産も記録されているが,減退に伴いその生産 は 2014 年に終了した。今回は,CO₂ 圧入を行うための圧 入井,CO₂ 圧入による enhanced gas recovery (EGR)効果 を確認するための生産テスト井および各種観測による貯留 層内での CO₂ 分布状況の把握を目的とした観測井の3坑 を新規に掘削する計画であり,プラント建設工事と並行し て坑井の掘削作業を実施中である。

今回掘削する坑井には、7インチケーシングパイプの 外側に、光ファイバーを用いた distributed acoustic sensor (DAS)を設置しており、坑井基地に隣接して設置する小 型の震源装置を利用することで、圧入中の CO₂ 拡散状況 のモニタリングを行う計画である。また、構造解釈のため の物理探査データの取得も計画している。

掘削に際し,遮蔽層となる泥岩層や貯留層のコアサンプ ルを取得し,これを用いた岩石力学的検討も実施している。 さらに,新規の地質モデルおよびガス層のシミュレーショ ンモデルを構築し,圧入計画の立案などに利用する計画で ある。地質・物理探査およびガス層に関する評価計画の概 略を図7に示す。

なお、本実証試験のうち水素・アンモニアの製造および CO₂回収については、国立研究開発法人新エネルギー・産 業技術総合開発機構(NEDO)から、「燃料アンモニア利用・ 生産技術開発 / ブルーアンモニア製造に係る技術開発」と して採択された助成事業のもとで実施しており、CO₂の地 中貯留の実施と評価については、独立行政法人エネルギー・ 金属鉱物資源機構(JOGMEC)と共同研究「天然ガス利用 等における低炭素化を目的とした国内枯渇油ガス田を活用

石油技術協会誌 90巻2号 (2025)

した CO₂ 貯留可能量把握に関する実証試験」として実施 している。

4. 今後の展開-本実証試験の成果を生かして

本実証試験は高効率ブルーアンモニア製造プロセス技術の開発を大きな目的の1つに掲げ、ブルー水素・アンモニアの製造からその利用までを一貫して実証する試みであり、2025年の稼働を目指し現在実証プラントの建設工事と坑井の掘削作業を並行して進めている。

本実証試験は、当社の水素・CCUS 分野の中長期的な目 標の達成のための重要な取り組みと位置づけており、本実 証を通じ得られる水素・アンモニア製造および CO₂ 圧入 に関する一環操業の知見やプロセス技術などをもちいて、 燃焼時に CO₂ を排出しないブルー水素、ブルーアンモニ アの商業生産プロジェクトを国内外で立ち上げていくこと を中期的な目標としている。

謝 辞

公表に際し,許諾をいただいた国立研究開発法人新エネ ルギー・産業技術総合開発機構,独立行政法人エネルギー・ 金属鉱物資源機構にこの場を借りて御礼申し上げる。

SI 单位换算係数

inch × 2.54* E-02=m *は正確な値

引用文献

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO),2022:カーボンリサイクル・次世代火力発電 等技術開発 / 次世代火力発電技術推進事業 / ブルーアン モニア製造技術に関する実現性検討.2021 年度調査報告 書.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)55 ~ 60 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 55~60

講 演 Lecture

天然水素の動向* ~クリーンエネルギー資源としての可能性と課題~ 小 杉 安由美**.[†]

(Received December 23, 2024; accepted March 4, 2025)

Natural hydrogen -potential and challenges as a clean energy resource

Ayumi Kosugi

Abstract: With the establishment of low-cost production technologies and global supply chains becoming major issues in the widespread use of hydrogen, natural hydrogen (white hydrogen) is attracting increasing attention as a future source of hydrogen. In addition to its low cost and low carbon intensity, it has the potential to become a new primary energy source unrestricted by current energy geopolitics because of its different generation process from that of oil and natural gas. Reflecting these expectations, the number of exploration projects has been increasing worldwide in recent years, and start-up companies conducting exploration have been successful in raising funds. Public funds have also begun to be invested, and mining laws and other laws for conducting natural hydrogen exploration are being developed in several countries. The challenge is that the full extent of the natural hydrogen system, which consists of the generation, migration, and accumulation process, is not yet known, making it difficult to estimate resources and reserves and, therefore, to understand the economic viability of the project. Only the Bourakébougou project in Mali has reached demonstration production, while the other cases are still in the "observation" and "well test" stages. The natural hydrogen industry is in its infancy at present, but as exploratory drilling and seismic surveys of individual projects progress, the hydrogen system will be revealed with greater resolution. As a result, it is expected that projects with more suitable conditions for development will be discovered, which will lead to development and production.

Keywords : natural hydrogen, exploration, hydrogen system

1. はじめに

ゼロエミッション燃料として脱炭素社会実現に向けた普 及が期待されている水素は、化石燃料の水蒸気改質や水の 電気分解等により製造されている二次エネルギーである。 その普及には低コストの生産技術の確立やグローバルサプ ライチェーンの構築などが大きな課題となっている中、将 来の水素の供給源として天然水素への注目が高まってい る。天然水素とは、石油や天然ガスのように自然に生成し た水素ガスのことを指す。工業的に製造されるグレー水素、 ブルー水素、グリーン水素に対して、天然水素はホワイト ともゴールドとも呼ばれている。

水素は、地球上で最も多く存在する元素でありながら、 最も軽い元素であるためリークしやすく、反応性が高いこ とから水(H₂O)やメタン(CH₄)として存在し、水素単 体で地下に鉱床という形で存在するとは想定されていな かった。天然水素の発生に適した地質(先カンブリア紀の 楯状地や中央海嶺・オフィオライトなどの超苦鉄質岩体) は、石油天然ガス産業の興味の対象ではなく、同産業にお ける堆積盆地を中心とした掘削では、水素に富む天然ガス が発見されることはまれであった。金属資源産業ではこれ らの地質体がターゲットとなることはあるが、そもそも鉱 業活動において掘削中にガス組成の定常的なモニタリング をすることはまれである。

このように見逃されていた天然水素であるが、米国地 質調査所(United States Geological Survey: USGS) によ ると世界には5兆tの天然水素が存在する可能性がある (Hydrogen Insight, 2024)。また、その生産コストは1ドル /kg-H₂とも推定されており(Gaucher, 2023)、その可能性 は魅力的に見える。本当にそんなものがあるのかと疑いの

^{*} 令和6年11月12日, 令和6年度秋季講演会「低炭素エネルギー システムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 This paper was presented at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system: Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{**} 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構エネルギー事業本部 水素事業部水素事業課 Japan Organization for Metals and Energy Security Energy Business Unit Hydrogen Project Department

[†] Corresponding author : E-Mail : kosugi-ayumi@jogmec.go.jp

目を向けながらも、もし安くクリーンな水素を、これまで 石油天然ガス分野で培った技術力を生かして得ることがで きるのならば、グリーン水素と並んでカーボンネットゼロ 社会に貢献するエネルギーとして、さらには、天然資源の 新しい産業として期待できる。

本稿では、筆者の2023年8月のレポート「天然水素の 動向」(小杉、2023)に最近の動向を加えて紹介するとと もに、石油天然ガス産業がたどってきた過程と比較して「天 然水素産業」が現在どのような位置にあるのかを理解し、 その商業可能性を左右する要因についても検討したい。

2. どこでどのように生成するのか?

天然水素は世界中で広く観測事例があり、たとえば、 トルコ・ヤナルタシュの Chimaera では「永遠の火」と 呼ばれる地面の割れ目からメタン(87 vol%)と水素(10 vol%)の混合ガスが漏出し、少なくとも数千年にわた り燃え続けている(Etiope, 2011)(図1)。オマーンの Samail オフィオライト(世界最大規模の超苦鉄質岩の露出 帯)では、溶存水素を含む強アルカリ泉が流れる小川があ り、一部では遊離水素ガスが河床から発生する様子も見ら れる(Leong, 2023)。そのほかにも、スペイン(Ronda)、 カナダ(Tableland)、ニューカレドニア(Prony Bay)、イ タリア(Voltry Massif)等や、日本では長野県白馬八方温 泉で観測されている(Suda, 2014)。

海洋域でも観測されており,2000年に大西洋中央海嶺 付近にて発見されたLost City と名づけられた海底熱水域 では、低温(<90℃)かつ強アルカリ性(pH9~11)で 水素および非生物起源メタンに富む熱水と、これをエネル ギー源とする生態系が確認されている(Kelley,2001)。 近年の天然水素への関心の高まりから、学術的研究の対象 として従来知られていた観測地に加え、フランス、ブラジ ル、ナミビア、南アフリカ、アルバニアなどで新たな観測 事例の報告が続いている。

自然界にはさまざまな水素発生プロセスがあるが、岩石 と水の反応がよく知られているプロセスである(図2)。 すなわち、①蛇紋岩化反応(かんらん岩等の鉱物中に含 まれる鉄が酸化する際に水を還元)と、②水の放射性分 解(岩石に含まれる放射性元素の壊変により発生する放射 線が水を分解)である。①のプロセスは,②のプロセスよ りも反応スピードが速いため、より注目を集めている。 ②の水素の生成速度は標準圧力温度条件において、1.9× 10⁻⁹ Bcf/km³yr(年間単位岩石量当たり)であり,一方, ①の蛇紋岩化反応(300 ℃, 35 MPa, 水-かんらん石比 1.6 ~ 2.6) では 182 Bcf/km³yr という実験結果がある (Jackson, 2024)。蛇紋岩化反応については温度・圧力条件および水 -かんらん石比といった前提条件により結果が異なるた め、単純な比較は容易ではないが、単純なオーダー感比較 では10¹¹倍程度の違いがあり、①による水素生成効率が 高いことを示唆している。堆積岩中の有機物が熟成してで きる石油・天然ガスに対して、天然水素のこれらの生成プ ロセスは火成岩と水の化学反応であるという違いがある。

石油技術協会誌 90巻2号 (2025)



c) 大西洋中央海嶺付近 Lost City の海底熱水鉱床の様子 (Kelley, 2001)。50℃の熱水の噴出孔の頂部。羽毛状の 炭酸塩が成長している(いずれも出所から一部改変)

また、石油・天然ガスが数億年前の比較的短い時間に堆積 した有機物を原料として、長い時間をかけて生成されるの に対して、蛇紋岩化反応などはそれと比較すると非常に短 時間で生成するという特徴がある。

そのほかの生成プロセスとしては、水素を大量に含む地 球深部のコアや下部マントルから排出された水素がプレー ト境界や断層に沿って浅部まで上昇するもの、断層活動 などの岩石の破砕に伴うもの、火山活動によるものなどが ある。

大気中の水素の濃度は 0.5 ppm であり、それよりも 高濃度であれば濃集と呼ばれるようになるが、マリの Bourakébougou やオマーンの Samail オフィオライトでは それぞれ 97.4 vol% (Prinzhofer, 2018)、93.8 vol% (Leong, 2023) という非常に高濃度の水素ガスが観測されている。 このような純度の高い水素ガスは珍しく、前述のトルコ・ Chimaera や Lost City ではメタンのほうが多く含まれてい る。加えて、ヘリウムが混合している場合もある。ヘリウ ムは半導体製造の雰囲気ガス等として工業的に利用される が、希少であり、足元では 450 ドル/Mscf と価格が高い ため、天然水素ガスと混合するヘリウムガスの量は、プロ ジェクトの経済性にも大きく影響する。

3. 可能性:なぜ期待されるのか?

石油精製や肥料利用などの既存用途や、ネットゼロに向 けた発電利用など、今後拡大が期待される水素需要に向け て、天然ガスなどの化石燃料の改質や再エネを利用した 水の電気分解による工業生産が行われており、カーボン 排出量を低減させるための二酸化炭素回収・貯留(carbon dioxide capture and storage: CCS) や, 電解装置の導入など, 生産される水素のクリーン化のためにコストがかかってい る。一方、天然に発生する水素が、分離生成のコストの低 い遊離ガス田としてまとまった量が存在していれば、工業 的製造に係るエネルギー消費や CCS のコストは不要であ り,石油天然ガス分野における既存の開発・生産技術を適 用することで、グリーン・ブルー水素よりも、低コストで 同等にクリーンな水素が生成できる可能性がある。また、 石油天然ガスと同様に安定的な生産が期待できるため、余 剰再エネを利用して断続的に生産されるグリーン水素の補 完的位置づけとしても利点もある。

前述のとおり,石油天然ガスとは生成プロセスが異なり, 生成に関与する岩石・地質,つまり地域が異なることから, 天然水素は現在のエネルギー地政学にとらわれない新たな 一次エネルギーとなる可能性もある。国内のポテンシャル については調査が必要であるが,国産一次エネルギーとし て利用が可能となれば,資源に乏しい日本にとって,新た な選択肢ができる意義は大きい。

海外の動向

これまで述べてきたような期待から,海外における取り 組みは,民間を皮切りに,政府も巻き込みながら活発化し ている。

4.1 プロジェクト動向

表1に探鉱ステージの進んでいる主な案件の一覧を示 す。スタートアップ企業(一部はASX, NYSE等で上場) を主体に探鉱が進められているが,現時点では,商業開 発はもちろん,最終投資決定(final investment decision: FID)に至っている案件はない。

先進的な事例としては、カナダ・Hydromaの Bourakébougou案件(マリ)があり、実証レベルではある が生産が行われている。生産した水素を直接燃焼して発電 し、近隣の村に電気を提供するパイロットプロジェクトを 2012年から開始し、現在に至るまで12年間圧力減退せず 生産を続けている。1987年の水井戸掘削の際に偶然に水 素ガスが発見されたものであり、今般の天然水素探鉱の流 れのきっかけをつくったといえる案件である。

そのほかに試掘を実施済みの案件としては、2019年に 米国で初めての試掘を実施した米国・Natural Hydrogen Energy の Geneva 案件(ネブラスカ州),2023年にオー ストラリアで初の試掘を実施したオーストラリア・Gold Hydrogen の Ramsay 案件(南オーストラリア州)がある。 後者の案件では、2024年に坑井テストを実施したほか、 二次元地震探査を実施しており、これらの結果を今後の試 掘計画へ反映していく予定である。

生産計画のスケジュールを公表している案件としては、 スペイン・Helios Aragon Exploracion の Monzón 案件(ア ラゴン州)があり、2029年の生産開始、プラトー期間で は5万5000~7万t/yrの生産目標を掲げている(Helios Aragon, 2023)。1963年に石油天然ガス探査で掘削された 井戸から水素とヘリウムの混合ガスを検出しており、2024 年後半に掘削予定の評価井により可採埋蔵量を把握、その 後、基本設計(front end engineering design: FEED), FID を予定することとなっている。

Block25 (Bourakébougou)	Nemaha, Geneva	Ramsay	Monzón	Regalor 調査プロジェクト	
カナダ・Hydroma	オーストラリア・Hyterra (ASX:HYT),米国・Natural Hydrogen Energy LLC	オーストラリア・Gold Hydrogen Limited (ASX:GHY)	スペイン・Helios Aragon Exploracion S.L.	フランス・La Française de l'Énergie (FDE) 他	
マリ	米国	豪州	スペイン	フランス	
クリコロ州	カンザス州・ネブラスカ州	南豪州	アラゴン州	ロレーヌ盆地	
98% H ₂ , 1% CH ₄ , 1% N ₂	92% H ₂ , 3% He (Nemaha)	95.8% H ₂ , 17.5% He	H ₂ , He	15% H ₂ , CH ₄	
 小規模実証生産(2012~) これまで30の試掘(生産 井1,評価井29) 	 ・ 試掘 (Geneva, 2019) ・ 6 本試掘予定 (Nemaha) 	 ・ 試掘 (2023) ・ 坑井テスト, 2D 地震探査 (2024) 	 ・ 試掘予定(2024) ・ 2029年の生産開始 ・ プラトー期間では年55,000 ~ 70,000トンの生産目標 	 CBM の研究プロジェクトにおけ る試掘で水素観測(2023) 	

表1 主な天然水素探鉱プロジェクト

また、注目すべき動きとして、オーストラリアでの鉄鉱 山開発を基幹事業とする Fortescue Metals Group のグルー プ子会社である Fortescue Future Industries Technologies が、米国カンザス州とネブラスカ州で天然水素の探鉱を実 施している HyTerra へ出資(株式 39.8%を 2190 万オース トラリアドルで取得) することが 2024 年8月に公表され た (HyTerra, 2024)。本出資により HyTerra は坑井の試 掘キャンペーンを2本から6本に拡大して実施するとして いる。Shell, BP などのオイルメジャーは大学等とコンソー シアムを組んで研究ベースの情報収集にとどまっていたと ころ、本件は、資源メジャー企業による天然水素探鉱企業 に対する初めての出資であり、天然水素産業が新たな局面 に進んだ感がある。2024年10月には、大阪ガス株式会社 と三菱重工業株式会社が天然水素の探鉱を実施している米 国スタートアップ企業 Koloma への出資を発表し、本邦企 業による取組も始まっている(大阪ガス、2024;三菱重工 業, 2024)。

4.2 政府や公的機関による調査・サポート状況

USGS, カナダ国立科学研究所 (Institut National de la Recherche Scientifique : INRS), フランス地質調査所と BRGM のコンソーシアム等は,各国の天然水素のポテン シャルマッピングを実施している。オーストラリア・クイー ンズランド州では 2024 ~ 2025 年予算として同州の天然水 素のポテンシャル調査向けに 400 万オーストラリアドルを 計上しており,オーストラリア・ニューサウスウェールズ 州では Geoscience Australia がデスクトップスタディーと 土壌サンプリングを完了させている。

公的資金の投入としては、2023年に米国エネルギー 省傘下のエネルギー高等研究計画局 (Advanced Research Projects Agency Energy: ARPA-E)が革新的技術プログラ ムとして、18 プロジェクトに対して計2400万ドルの補助 金交付を企業、大学、研究所等を対象に決定している(生 産レートの増進技術、生産技術・貯留層マネジメント、探 鉱技術等) (ARPA-E, 2025)。

新興国では石油天然ガスと同様な扱いで入札の動きがあ る。フィリピンでは、2024年2月に公募を開始、8月末の 入札ではルソン島中央部2地域について計5件の申請があ り、11月に事業者選定を完了している。同時点では具体 的事業者名は非公表であるが、大統領府の承認が得られ次 第、契約を締結予定である。コロンビアでは、入札の実施 に向けた特定地域の地質調査が公募のうえ実施されている。

天然水素の探鉱・開発の促進に不可欠な許認可に関す る法整備も各国で進んでいる。フランス(2022年),南 オーストラリア州(2021年),西オーストラリア州(2023 年),ポーランド(2023年)では、鉱業法等の改正によ り、法律の規制対象物質として天然水素の位置づけを明確 化させ、天然水素を対象とする探鉱権の発給が可能となっ た。南オーストラリア州では、天然水素開発時のロイヤル ティーもすでに定められている。

5. 課題:水素システムの解明

安価でクリーンな水素資源として期待が高まり,探鉱も 活発化している中,課題となっているのは,水素システム の全容の解明である。

石油天然ガスの探査において、油・ガス田の成立条件を、 炭化水素の生成、排出、移動、集積といったプロセスや根 源岩、貯留岩、帽岩等の諸要素に分解して検討することが ある。石油天然ガスシステムのアナロジーとして水素シス テム(図2)が検討されている。しかしながら、生成の深 度や移動のメカニズム、移動中にどの程度の損失があるの か、リークしやすい水素をどのような岩石や構造がトラッ プするのか、貯留層の岩相や深度といった、詳細が分かっ ていない。

このような理論上の天然水素システムは、試掘による 「現場証拠」を積み重ね更新され、具体化されていくこと になるが、現在までのところ、広範囲に及ぶ多数の評価井 の掘削に基づき水素の貯留層が確認されているのはマリの Bourakébougou 案件のみである。また、マリの浅部貯留層 の試掘結果からは、貯留層は多孔質の炭酸塩岩、帽岩はド レライト(火成岩)と推定されている (Maiga, 2023)。 このような帽岩は石油天然ガスシステムにおいては想定 されないものであり、水素システムの特異性の一端がう かがわれる。オーストラリア・Ramsayの坑井試験,今後 予定されているスペイン・Monzonの評価井掘削,米国・ Nemaha 案件の試掘キャンペーン等により、個々の案件の ガス濃度,流量,貯留層圧力,貯留層や帽岩の岩相等が明 らかにされることで、天然水素システムの解像度が上がり、 それに従い商業化ポテンシャルがよりはっきりと見えてく るだろう。

現在は、既存坑井のガス測定データや地下から水素が漏 出した際に形成される円形の地形(フェアリーサークル) を重要な手がかりにして、トップダウンアプローチ的に探 鉱が進んでいるステージである。試掘事例が増え、水素シ ステムの理解が進むことで、適切な探査方法を選択・開発・ 適用できるようになり、石油天然ガス産業がたどった道の ように、仮説・コンセプトに基づいた探鉱活動がボトムアッ プ的アプローチで進むと期待したい。リモートセンシング、 地表踏査からの有望地の絞り込み、物理探査(重力探査、 磁力探査、地震探査等)により、地質的成功確率を正確に 把握するボトムアップアプローチが目指すべき次のステー ジである。

探鉱と並行して、生成速度の速い蛇紋岩化反応を利用 して、人工的にその反応を促進させて水素を生成、回収 する試みも進んでいる(オレンジ水素と呼ばれる)。電 気による岩石の破砕技術をもつ Eden GeoPower は、オ マーンエネルギー鉱物省(Ministry of Energy and Minerals: MEM)と覚書を締結し、同国で水素の人工 増進の実証試験を進めている(Business Wire, 2023)。 オマーンの Samail オフィオライトにおいて同社の破砕技 術を利用し、岩石と水の反応を最大化して人工的に水素



図2 天然水素システム

を生成、回収する計画である。本件に限らず、前述した ARPA-E の補助金交付対象として採択されている案件の多 くが人工増進に係る技術開発を目的としている。最適条件 (温度, 圧力, 岩相, 水質, 適した触媒等) が模索されて いる研究段階にあり、完晶質で緻密な岩石を破砕する技術 的課題もあり、その実用化には不確実性があるが、このよ うな公的資金投入が研究を加速させるだろう。

6. 商業的な実行可能性:コスト要因は?

探鉱が成功し、水素の貯留層を発見、安定的なフローが 得られそうな鉱床が特定されることが天然水素開発に向け た第一の関門であるが、その次には商業的な実行可能性を 左右する多岐にわたるコスト要因を検討する必要がある。 主なコスト要因や商業化に当たっての課題を以下に記載 する。

濃度・性状

水素ガスの濃度,含水量によって,精製や水分離プ ロセスのコストが決まる。また、メタンやヘリウム の混合率により、副生産物としてプロジェクトの経 済性向上に貢献する場合もあれば、分離・廃棄のた めコストとなる場合(加えて製品水素の炭素集約度 を上げてしまう可能性)もある。

- ② 資源量·可採埋蔵量 経済的に採掘可能な埋蔵量が大きければ、スケール メリットのある大規模な生産が可能となり、さらな るコスト削減が可能となる。
- ③ 貯留層深度·形状·位置 深度が深ければ坑井掘削コストが上がる。また、貯 留層の構造により垂直・水平・傾斜掘等を適用する 必要がある。
- ④ 坑井圧力に影響する貯留層圧力 前述の深度にも関わるが、貯留層圧力が十分にあれ ば,自噴により人工的に採取する設備は不要となる。

⑤ 生産レート

生産開始後の生産レートが十分に得られれば、早期 の利益回収につながり、収益性の高いプロジェクト となりうる。

⑥ 政府支援の有無

クリーン水素に対する税額控除や補助金制度が各国 で実施されているが、天然水素がその対象となれば ファイナンス上有利となる。たとえば、米国のイン フレ抑制法のセクション45Vではクリーン水素生 産に関わる税額控除を定めているが、低排出技術の 種類は問わないため、天然水素案件も条件を満たせ ば対象となりうる。仮に、Brandt(2023)で試算さ れたように坑井に係る炭素集約度が 0.37 kg-CO2e/ kg-H₂であれば、閾値である 0.45 kg-CO₂e/kg-H₂を 下回っているため,制度上の最大額である3ドル/ kg-H。の税額控除を受けることができ、プロジェク トの競争力が高まることになる。

⑦ 中流でのコスト

生産地から需要地までの距離、既存パイプラインの 有無などは、輸送費に反映される。圧力維持、素材 に対する水素脆化,リーク対策など、水素輸送に特 有の技術的課題,コスト要因もある。海外への輸送・ 輸出では液化, MCH 化に伴って, LNG より低い液 化温度や低いエネルギー密度がコスト要因としてあ げられる。

下流における課題

天然水素に限らず、人工の水素も含めて水素一般が 抱える課題として、需要が少なくインフラを含めサ プライチェーンが整っていない現状がある。この課 題はまさに、海外でも政府支援による解決が目指さ れており、日本においても水素社会推進法のもと, 価格差に着目した支援や拠点整備支援が始まろうと している。同法の支援制度により、低炭素水素の供 給・利用が促進され、効率的なサプライチェーンが 構築されることは、今後の水素社会を実現するには 不可欠な取り組みであると同時に、天然水素の可能 性をさらに広げるものでもある。供給拡大と需要拡 大という「価格」によってつながれた関係は、鶏と 卵の関係であるが、低コストの天然水素という新た な要素が供給側に投じられれば, 需要家による利用 を活発化させ、需給関係を動かす推進力になりうる。

7. おわりに

工業的に製造されるブルー、グリーン水素に比べて低コ ストである天然水素が、仮に経済的に相当量供給可能とな れば、脱炭素化に向けた水素社会の実現に向けて重要な要 素となることは間違いない。また、資源の乏しいわが国に とって、国産の一次エネルギーに天然水素が加われば、エ ネルギー安全保障の観点からも利点が大きいので、産学官 が連携し戦略的に取り組む必要がある。6章で挙げたよう に、メタンとは異なる水素特有の性質による特異な課題が

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

ありつつも,天然水素産業のコスト要因・課題の多くは天 然ガス開発事業や人工水素が抱えるものと共通しており, 既存技術の改良や現行の政策により解決が目指せるもので ある。

期待は高まるが、いまだ実例が乏しい現状である。実証 生産に至っているのはマリ・Bourakébougou 案件のみであ り、ほかの例は「観測」や「坑井テスト」の段階にとどまっ ている。また、Bourakébougou 案件の生産量は 1500 m³/d (Maiga,2023)(約50 t/yr)とあまりに小さい。仮にスペ イン・Monzón 案件と同サイズのプロジェクト(5万5000 ~7万 t/yr)が40個稼働したとして、やっと、国際エネ ルギー機関による2050年の需要予測量3億トンの約1% に相当する量である。そして、我々が現在いる地点はいま だ水素システム解明の入り口であることも認識したい。

このような黎明期といえる現状においても、高まる期待 を背景として、Koloma や HyTerra のように、探鉱を担う スタートアップ企業は資金調達に成功しており、資源メ ジャーの参画も始まろうとしている。「天然水素産業」に 徐々に資金が集まり、さらなる試掘や調査が進むことで データが蓄積され、水素システムの輪郭がはっきりしてく れば、その仮説に基づいたボトムアップの探鉱が進み、現 在は探知しにくい天然水素貯留層の発見事例が増えていく だろう。その中で、より開発可能な条件を多く持つ案件が 見いだされ、開発・生産へ至ることを期待したい。

引用文献

- ARPA-E, 2025: Geologic Hydrogen (Topic G & H) PROJECT DESCRIPTIONS. https://arpa-e.energy.gov/sites/default/ files/2025-01/Project%20Descriptions_GeologicHydrogen. pdf (accessed 2025/3/3).
- Business Wire, 2023: Eden Signs World's First Agreement to Study and Demonstrate the Potential of Stimulated Geologic Hydrogen in Oman. https://www.businesswire.com/news/ home/20230926441652/en/Eden-Signs-World%E2%80%99s-First-Agreement-to-Study-and-Demonstrate-the-Potentialof-Stimulated-Geologic-Hydrogen-in-Oman (accessed 2025/2/21).
- Brundt., A. R., 2023: Greenhouse gas intensity of natural hydrogen produced from subsurface geologic accumulations. *Joule*, 7, 1818–1831, doi.org/10.1016/ j.joule.2023.07.001.
- Etiope, G., *et al.*, 2011: Abiotic methane flux from the Chimaera seep and Tekirova ophiolites (Turkey): Understanding gas exhalation from low temperature serpentinization and implications for Mars. *Earth Planet Sci Lett*, **310**, 96–104, doi.org/10.1016/j.epsl.2011.08.001.

Gaucher, E. C., et al., 2023: The place of natural hydrogen

in the energy transition: A position paper. *European Geologist. European Geologist*, **55**, 5–9, doi.org/10.5281/zenodo.8108239.

- Helios Aragon, 2023: THE MONZÓN NATURAL HYDROGEN PROJECT. https://helios-aragon.com/monzon-naturalhydrogen/(accessed 2024/10/14).
- Hydrogen Insight, 2024: https://www.hydrogeninsight.com/ innovation/there-is-enough-natural-hydrogen-undergroundto-meet-all-demand-for-hundreds-of-years-says-usgovernment-agency/2-1-1600507 (accessed 2025/2/21).
- HyTerra, 2024: Fortescue's future tech arm invests \$22m in white hydrogen explorer HyTerra, https://hyterra.com/ fortescues-future-tech-arm-invests-22m-in-white-hydrogenexplorer-hyterra/ (accessed 2025/2/21).
- Jackson, O., *et al.*, 2024: Natural hydrogen: sources, systems and exploration plays. *Geoenergy*, **2**(1), doi.org/10.1144/ geoenergy2024-002.
- Kelley, D. S. *et al.*, 2001: An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N. *Nature*, **412**, 145–149, doi.org/10.1038/35084000.
- 小杉安由美, 2023: 天然水素の動向.https://oilgasinfo.jogmec.go.jp/info_reports/1009585/1009871.html (accessed 2025/2/21).
- Leong, J. A., *et al.*, 2023: H₂ and CH₄ outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: Implications for lowtemperature, continental serpentinization rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 347, 1–15, doi.org/10.1016/ j.gca.2023.02.008.
- Maiga, O., et al., 2023: Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. Sci. Rep., 13, doi.org/10.1038/s41598-023-38977-y.
- 三菱重工業株式会社,2024:天然水素の革新的な探査技術を有するコロマ社に出資.https://www.mhi.com/jp/ news/241015.html (accessed 2025/2/21).
- 大阪ガス株式会社,2024: 天然水素の探鉱・開発・生 産を手掛ける米国スタートアップ企業との資本提携 について. https://www.osakagas.co.jp/company/press/ pr2024/1782203_56470.html (accessed 2025/2/21).
- Prinzhofer, A., et al., 2018: Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). Int. J Hydrogen Energy, 43 (2), 19315–19326, doi.org/10.1016/ j.ijhydene.2018.08.193.
- Suda, K., *et al.*, 2014: Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: The CH₄-H₂-H₂O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth Planet Sci. Lett.*, 386, 112–115, doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.005.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)61 ~ 66 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 61~66



カーボンニュートラルに向けたアンモニアの役割*

村木 茂**.*

(Received December 19, 2024; accepted March 19, 2025)

Role of Ammonia toward Carbon Neutrality

Shigeru Muraki

Abstract: Ammonia is expected to become one of the key carbon free fuels by its direct combustion technologies for decarbonization in the energy market. Japan launched Hydrogen Society Promotion Act in 2024 to support Hydrogen and Ammonia Supply Chain and Infrastructure developments through extensive support programs.

Ammonia direct combustion technologies are progressing well. Ammonia combustion in coal boilers is ready for commercial use after the success of large-scale demonstration in JERA's IGW coal power plant in 2024, and commercial use is planned to start from 2027. 2 MW – 400 MW ammonia Gas Turbines are underdeveloped through 2020s, and various sizes of ammonia GTs will be commercialized in 2030s. Ammonia for maritime fuel is expected to become a global market, and developments of marine diesel engines are underway. Small ammonia engines have been installed in Tag Boat since August in 2024, and safety measures to use hazardous ammonia in engine room are under development. Large engines will be developed by 2026. Ammonia combustion burners for industrial furnaces are expected to be developed by 2025.

Various clean ammonia supply projects in which Japanese companies are involved are planned in US, Middle East, India and Australia.

Hub and Spoke system are planned to develop import terminals and utilization facilities in Japan by utilizing coastal tankers, tank lorries and railroad cars which can cover wider areas and range of demand efficiently. Currently, 8 hub terminals in 6 areas are proposed.

The expected demand in 2030 is 3MM tons mainly driven by combustion in coal power plants, and demand in small to medium size gas turbines, maritime fuel and industrial furnaces will be gradually created through 2030.

Clea fuel ammonia will be positioned to play a vital role in the decarbonization of various energy sectors with its versatility, efficiency and developed infrastructure technologies.

Keywords : Ammonia, carbon-free fuels, decarbonization, Hydrogen Society Promotion Act in 2024, Hydrogen and Ammonia Supply Chain and Infrastructure, direct combustion technologies, clean ammonia supply projects, import terminals, Ammonia gas turbines

1. はじめに

日本は2017年に世界に先駆けて水素基本戦略を策定し, 2023年に改定を行っている。ここでは大規模な水素などの活用に向けて海外からの輸入を視野に入れて,2050年 に向けた水素価格と需要量のロードマップを策定している。

日本では水素などの輸入に向けた国際水素サプライ チェーンの構築を目指し、水素キャリアとして、液化水素、 有機ハイドライト、アンモニアに取り組んできている。こ うした中で2024年にはGX経済移行債から約7兆円を活 用して水素などの導入支援を行う水素社会推進法が施行さ れた。ここでは水素などと既存燃料との値差を15年にわ たり支援する値差支援への約3兆円と、水素などの輸入活 用拠点形成に向けた拠点整備支援への約1兆円が主要な支 援策として盛り込まれている。

2. クリーン燃料アンモニアに期待される役割

日本が取り組んでいる3つの水素キャリアの内,まず液

^{*} 令和 6 年 11 月 12 日, 令和 6 年度秋季講演会「低炭素エネルギー システムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」で講演 This paper was presented at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system: Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{**} クリーン燃料アンモニア協会会長 President, Clean Fuel Ammonia Association

[†] Corresponding author : E-Mail : s-muraki@greenammonia.org

化水素はマイナス 253℃の極低温液体で水素純度が高いという特徴は有しているものの,大規模サプライチェーンに向けて液化効率の向上,貯蔵・輸送設備の開発がまだその途上にある。有機ハイドレートであるメチルシクロへキサン (MCH) は常温で液体であるため既存の石油関連設備の転用が可能であるが,貯蔵・輸送効率が低く,分解して水素を取り出すのに大量の熱が必要であり,水素キャリ

アとしての効率が低いことが課題となる。一方アンモニア は肥料や化学品の市場ですでに大型サプライチェーンが確 立されており、水素キャリアの中では貯蔵・輸送効率が最 大で、最も早期の実現性が高いとみられている。ただし、 アンモニアには毒性があるので、その安全対策には万全を 期す必要がある。このアンモニアの最大の特徴は直接燃焼 技術を通じて幅広いエネルギー市場でゼロエミッションエ



(水素基本戦略(概要)より引用し追記)

図1 水素基本戦略シナリオ(経済産業省, 2017)



図2 水素エネルギーキャリア (IEA, 2019)





出典: JERAウェブサイト 図3 石炭火力における利用 (JERA, 2021)

ネルギーとして活用が可能だということである。さらにこ の燃焼技術で日本が世界をリードしており、日本の技術の 国際展開が期待できる。こうした状況の中で、すでに日本 企業が参画するブルーとグリーンのクリーン燃料アンモニ ア供給プロジェクトや国内輸入利用拠点の具体的計画が進 んでおり、クリーン燃料アンモニアバリューチェーンの構 築の早期実現により、日本の脱炭素化に貢献することが期 待されている。

3. 直接燃焼利用技術

アンモニアの直接燃焼技術としては、まず石炭火力の アンモニア燃料転換が最も進んでいる。すでに 60%燃料 転換バーナーまでの開発が完了している。2024 年 3 月か ら 6 月まで JERA の碧南火力 100 万 kW 石炭火力で 20%燃 料転換の大規模実証が成功裏に行われ、排ガスについて NOx は少し減少、N₂O と未燃アンモニアは検出されない ことが確認された。これを受けて、JERA は 2027 年度から 20%燃料転換を皮切りに商用利用を開始する計画である。 また、石炭火力の多い東南アジアを中心としたアジア各国 で日本技術による feasibility study (FS) が実施されている。

将来のアンモニア発電の切り札となるガスタービンにつ いては2 MW から 400 MW のタービンでの専焼技術の開 発が進んでいる。2 MW から 60 MW クラスのアンモニア



出典:IHIウェブサイト



出典:三菱重工技報

図4 ガスタービンにおける利用 (IHI, 2022; 松本ほか, 2022)

専焼ガスタービンについては 2020 年代の商用化を目指し て開発が進められている。300 MW から 400 MW クラスの 大型コンバインドサイクルガスタービンの専焼化について は 2030 年代の初めの商用化が目指されており、アンモニ アを直接燃焼させるシステムとアンモニアをタービン排熱 の一部でクラッキングして水素燃焼させるシステムの 2 方 式が開発されている。2030 年代にはアンモニアガスター ビンのラインアップが整うことになる。

グローバルな大型市場として期待される船舶燃料の世界 では、アンモニアディーゼルエンジンの開発が進んでい る。小型エンジンは今年からタグボートに搭載、実用化さ れている。現在、エンジンの調整と機関室でアンモニアを 取り扱うための安全対策の確立に向けた取り組みが進めら れている。大型エンジンは2026年に商用化される予定で、 2026年11月に大型のアンモニア燃料アンモニア輸送船を 就航させる計画が進められている。工業炉での活用も開発 が進んでおり、ガラス溶解炉を使ったアンモニア燃焼バー ナーの開発が進められている。2025年にはバーナーが開 発され、工業炉での展開も進んでいくものと見られている。

4. クリーン燃料アンモニアバリュー チェーン構築に向けた動向

クリーン燃料アンモニアの供給に関しては、北米、中東、 インド、豪州などでブルーとグリーンの供給プロジェクト が多く計画検討されている。

米国メキシコ湾岸のテキサス州,ルイジアナ州では日本 企業が参画するブルーアンモニアの供給プロジェクトが 数件計画されている。これらのプロジェクトは米国の IRA 支援策を活用し、コストの透明性や日本企業の参画といっ た日本のサプライチェーン支援策の条件を満たす可能性が 高く,有力なプロジェクトと見られている。その他のブルー アンモニア供給プロジェクトとしては、カナダ、アラブ首 長国連邦、サウジアラビアなどで日本企業も加わって計画 が検討されている。グリーンアンモニア供給プロジェクト としては、インドで活発な動きがあり、日本企業が参画す るプロジェクトも数件出てきている。その他では豪州のポ テンシャルが高いとみられている。

現状のコストや供給力からは、ブルーアンモニアのほう がグリーンアンモニアより勝っており、燃料アンモニア市 場の形成にはブルーアンモニアの役割が大きい。しかし、 今後再生可能エネルギーからの発電コストのさらなる低減 や水電解装置の大型化と大幅なコスト削減が期待される中 で、グリーンアンモニアの役割が大きく拡大していくもの と見ている。また、グリーンアンモニアは既存の化石燃料 供給国ではない新たな供給国からの供給を拡大することに なり、供給の多角化と安定性への貢献が期待できる。

5. 国内輸入利用拠点整備

国内の輸入インフラとしては大型輸入基地を核としてそ こから二次輸送を行うハブ&スポークシステムが計画され ており、6地区8基地で具体的な計画が進んでいる。

具体的には北海道の北海道電力苫東厚真石炭火力での利 用を核とする苫小牧,福島県で石油資源開発を中心とした 相馬,茨城県でJERA石炭火力での利用を核とする常陸那 珂と大型コンビナートの鹿島,中京地区でJERA 碧南火力 を拠点として中京地区全般をカバーするプロジェクト,大 阪で三井化学や関西電力による泉北地区,そして中国四国 地区では出光の山口周南と三菱商事の愛媛波方の連携拠点 である。

さらにアンモニアを分解した水素供給も計画されてい



図5 燃料アンモニアのサプライチェーン構築の可能性(クリーン燃料アンモニア協会作成)

る。二次基地や内陸の工業団地などではアンモニアを内航 船やローリー,貨車で運搬してオンサイトクラッキングで 水素供給をする方式が輸送,貯蔵コストを考えると最も合 理的な水素供給システムとなりうる。

現在,石炭火力でのアンモニア燃料転換に関して,2023

年度の長期脱炭素電源オークションプログラムの中で 2030年度までにアンモニア燃料転換することで、北海道 電力苫東厚真発電所 70万 kW、コベルコパワー神戸 70万 kW 2 基、JERA 碧南火力 100万 kW² 基が約定されている。 これに加えて四国電力西条発電所 50万 kW が加わる可能



CFAA作成。ハブ基地の場所は公開情報による。

図6 ハブ基地を中核とする拠点構想(クリーン燃料アンモニア協会作成)



図7 ロードマップ(サプライチェーン&利用技術)(クリーン燃料アンモニア協会作成)

性があり,総発電能力460万kWとなり,20%燃料転換 するとアンモニアの需要量は230万tとなる。このように 2030年までは石炭火力の燃料転換を中心に需要が伸びて いく。これに小型から中型のガスタービン,自家発電の燃 料転換,船舶燃料,工業炉での利用も加わり2030年には 約300万tの需要が見通される。2030年代になると大型ガ スタービン,船舶燃料での需要の拡大を通じてゼロエミッ ション燃料として重要な役割を果たしていくと期待される。

クリーン燃料アンモニアの供給に関しては、ブルー アンモニアが市場創生に重要な役割を果たしていくが、 2030年以降はグリーンアンモニアのコスト削減と相まっ てグリーンアンモニアの供給が拡大していき、ブルーアン モニアとともに脱炭素化に大きな役割を果たしていくもの と期待されている。

6. おわりに

2050年カーボンニュートラルに向けてさまざまな脱炭 素化への取り組みが進み始めている。こうした中でアンモ ニアを水素キャリアとしてだけでなく、クリーン燃料とし て直接燃焼利用することが即効性のある現実的な取り組み として注目されている。この最も実現性の高いアンモニア であってさえも現状の化石燃料と比べると割高であり、日 本では水素社会推進法による支援を受けて導入がスタート する運びである。

今後アンモニアをはじめとした水素などの導入により, 脱炭素化,経済成長,産業の国際的競争力を達成するとい う大きなチャレンジを進めていく必要がある。このために はクリーンアンモニアサプライチェーンのコストダウンは 元より、クリーンエネルギー利用による付加価値醸成をは じめとする政府の政策的支援などについて国際情勢を鑑み 適切に導入するといった取り組みを官民一体となり進めて いく必要がある。

我々協会はクリーン燃料アンモニアが今後の脱炭素化に おいて大きな役割を果たしていけるように取り組んでまい ります。

引用文献

- IEA, 2019: The Future of Hydrogen, https://iea.blob. core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (accessed 2020/01/30).
- 株式会社 IHI, 2022:世界初, 液体アンモニア 100% 燃焼 によるガスタービンで, CO₂フリー発電を達成 ~燃焼 時に発生する温室効果ガスを 99% 以上削減~, (accessed 2024/10/22).
- 株式会社 JERA, 2021:大型の商用石炭火力発電機におけ るアンモニア混焼に関する実証事業の採択について, https://www.jera.co.jp/news/information/20210524_677 (accessed 2024/10/22).
- 経済産業省,2017:水素基本戦略(案)概要,https:// www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/kaigi_dai2/ siryou1-1.pdf (accessed 2024/10/22).
- 松本 照弘・川上 朋・武石 裕行・三浦 圭祐・中村 聡介・由里 雄則,2022:カーボンニュートラルに貢献 する水素・アンモニア焚きガスタービンの開発状況.三 菱重工技報,59(4).

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)67 ~ 69 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 67~69

令和6年度秋季講演会

「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」

Autumn Meeting

"Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia"



Summary of closing remarks by Tatsuo Shimamoto

本日は、石油技術協会令和6年度秋季講演会にご講演、ご参加、また開催にむけてご尽力いただきまして、誠にありが とうございました。本講演会のテーマは、『低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~』でござ いました。

ここ5年の秋期講演会を振り返りますと、2020年はコロナ禍のため未開催でしたが、2021年は『脱炭素社会への移行に 向けた石油開発産業の課題』、2022年は『エネルギー安定供給とカーボンニュートラル推進の両立を目指す社会に向けて ~石油開発業界の持続的な役割~』、昨年は『CCS 事業化に向けた取組と課題』と、カーボンニュートラルな社会の実現に 向けた石油開発業界の持っている課題、社会的な役割、さらには当業界が中心的役割を担うであろう CCS 事業と、より具 体性を帯びる内容へとなってまいりました。そうして、冒頭にも述べましたように、今回は、CCS とは少し離れて、ある いは範囲を拡大する形で、低炭素エネルギーとしての水素・アンモニアについてお話していただきました。ここで、誠にせ んえつではございますが、本日の7つのご講演につき、まとめさせていただきたいと思います。

1. 「水素を巡る最近の動きについて~水素社会推進法~」

経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 水素・アンモニア課長 廣田 大輔様

初めに,経済産業省 水素・アンモニア課長 廣田 大輔様より,「水素を巡る最近の動きについて」のお話をいただき ました。

国内外のエネルギー政策の要諦は、S + 3E (安全・安定・経済性・環境) よりなるが、これらをすべて満たす完璧なエネルギー 源はない。ウクライナ侵攻をはじめ、安定性・経済性のリスクが再認識され、エネルギー危機に強い需給構造への変換が求 められている。こういった状況の中で、各国において、GX 投資や政府支援・規制の検討がなされている。日本でも、低炭 素水素などのサプライチェーン構築に向け、今年 10 月に水素社会推進法が施行されました。本公演では、これら現在進行 中の具体的な取り組みとともに、GX2040 ビジョンに向けた検討についても、ご紹介いただきました。

2. 「水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援~グリーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介~」

(独)エネルギー・金属鉱物資源機構 エネルギー開発金融部長 本橋 貴行様

次に、JOGMEC エネルギー開発金融部長 本橋様より、「水素・アンモニアプロジェクトに対する JOGMEC 支援~グ リーン水素を原料とする合成燃料製造事業の事業評価の紹介~」のご講演をいただきました。先ほど廣田様のご説明されて いた、S + 3E の相互関係から生じるエネルギートリレンマの問題を提起していただきました。また、これに基づく政策実 施機関としての JOGMEC の役割は、ファイナンス・テクノロジー・インテリジェンス(財務・技術・情報)を提供するこ

^{*} 令和 6 年 11 月 12 日, 令和 6 年度秋季講演会「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア〜」で講演 Summary of closing remarks at the 2024 JAPT Autumn Meeting entitled "Initiatives towards the societal implementation of a low-carbon energy system : Hydrogen and Ammonia" held in Tokyo, Japan, on November 12, 2024.

^{***} 株式会社 INPEX INPEX Corporation

とにある。水素製造基盤の確立を目指し,現状 200 万トン/年の水素供給量を,2030 年には 300 万トンに増加させる基幹 目標としている。2022 年の JOGMEC 法の改正以降,「ブルー」「グリーン」水素・燃料アンモニア, CCS, 合成燃料などの 案件の相談が複数寄せられているが,これらは世界でも事業化の実績が乏しく産業自体が未成熟なため,事業自体の不確実 性が高い。新規事業に関するファイナンスでは、リスクベースドアプローチをはじめ、石油・天然ガス事業の評価で得た知 見を生かすとともに、スタートアップ企業特有の評価基準も必要となるとのお話でした。また、合成燃料事業の評価の例と して、HIF Global 社への出資についてのお話がありました。

3. 「水素社会実現に向けた NEDO の取り組み」

(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 水素・アンモニア部 大規模水素利用ユニット GI 水素チーム

チーム長 釘宮 貴徳様

昼休憩を挟みまして、午後の部では NEDO、水素・アンモニア部の釘宮様より、「水素社会実現に向けた NEDO の取り組み」のご講演をいただきました。2017年日本は世界に先駆けて、水素基本戦略を策定しており、本年施工された、水素社会推進法につながっている。本邦では、現在年間 200 万トンの水素・アンモニア導入量を、2050年には 2000 万トンに拡大し、コストも化石燃料と同程度の水準までにすることを目標に掲げている。

GX 実現に向けて、2021 年にはグリーンイノベーション (GI) 基金が NEDO に造成された。このうちの半分は 2021 年から 30 年にかけて、水素サプライチェーンおよび水素発電を発展させ、商業化と社会実装を目指すものに充たされるとのことです。

GI 基金を含め、NEDO では水素の生産・輸送・利用を含むさまざまな取り組みがなされている。例として、アルカリ型 や PEM 型水電解、再エネ等由来の電力利用等々の水素製造、液化水素・MCH の輸送船・受け入れ基地などの輸送・貯蔵、 水素発電や燃料電池車両など利用法について、具体的な取り組みをご紹介いただくとともに、さまざまな普及活動にも触れ ていただきました。

4. 「ゼロエミッション火力の導入に向けた取り組み」

㈱ JERA 企画統括部 脱炭素推進室長 高橋 賢司様

次の2件は、JERA様・INPEX様から、各社様の取り組みをご紹介いただきました。いずれも、NEDOの基金を活用しての、 技術開発のご紹介でありました。

まず,JERA, 脱炭素推進室長高橋様より,「ゼロエミッション火力の導入に向けた JERA の取り組み」についてお話しい ただきました。JERA では、2020 年に掲げた『JERA ゼロエミッション 2050』に基づき、再エネと火力発電の相互補完を考 えている。また、NEDO の GI 基金などを活用しつつ, ゼロエミッション火力の実現に取り組んでいる。具体的な事業として、 碧南(碧南)石炭火力発電の 20%をアンモニアに転換する実証試験についてご紹介いただき、将来 50%以上をアンモニア にするための技術開発にも触れていただきました。さらに、サプライチェーンの構築に必要な、輸送、特にアンモニア輸送 船の開発や、国内日本企業との連携について語っていただき、アジアにおけるクリーンエネルギーの供給基盤を構築するた めの、各国に対する支援についても、ご紹介いただきました。

5.「新潟県柏崎市でのブルー水素・アンモニア製造・利用一貫実証試験の概要」

㈱ INPEX 水素・CCUS 事業開発本部 技術開発ユニット 副ジェネラルマネージャー 古座野 洋志様

引き続き, INPEX 技術開発ユニット副ジェネラルマネージャーの古座野様より, 『柏崎市でのブルー水素・アンモニア 製造・利用一貫実証試験』について, ご紹介いただきました。アンモニア製造に対し二酸化炭素の地下圧入を併用する場合, 燃焼排ガスからの CO₂ 分離が必要となり, コストの増大につながる。LNG 基地の冷熱を利用し, 空気を分離することによ り, 燃焼排ガスの純度を上げる試みが示された。柏崎ブルー水素・アンモニア製造一貫実証試験は, 国産天然ガスから水素・ アンモニアを製造し, その際生成される二酸化炭素を, 枯渇ガス田に圧入するという実証試験である。長年, 操業してきた ガス田なので, インフラもあり地下の情報はそろっており, モデリング・シミュレーションなどの作業を行っている。なお, 二酸化炭素の地下圧入に関しては, JOGMEC との共同研究, 水素・アンモニア製造に関しては, NEDO の助成対象である。 今回は, 実証プラントの建設工事の進捗も, ご報告いただきました。

6. 「天然水素の動向 ~クリーンエネルギー資源としての可能性と課題~」

(独)エネルギー・金属鉱物資源機構 水素事業部 水素事業課 小杉 安由美様

JOGMEC 水素事業課,小杉様より,「天然水素の動向 ~クリーンエネルギー資源としての可能性と課題~」についての お話がありました。天然水素とは,天然ガスのように自然に発生した水素で,97%の純度のものがマリで発見されておりま す。非常に興味深いものですが,その生成は,諸説あり鉄による水の還元などが,考えられているとのことです。将来,ブ ルー・グリーン水素の補完としての役割も考えられ,40以上の探鉱案件があるとのことです。また,各国の公的機関もそ の可能性に着目し,研究や資金の投入に乗り出しているとのお話でした。ただし,水素システムはいまだ解明されていない 部分が多々あり,加えて実例も乏しいのが現状です。

来年2月14日,ここ東京大学工学部 Haseko-Kuma Hall で開かれる『天然水素ワークショップ』にご参集いただければと思います。ワークショップは、石油技術協会・NEDO・JOGMEC 共催、資源エネルギー庁の協賛となっており、米国の地
質調査所などの専門家をお招きしております。

7. 「カーボンニュートラルに向けたアンモニアの役割」

(一社)クリーン燃料アンモニア協会 会長 村木 茂様

最後にクリーン燃料アンモニア協会(CFAA)の村木会長にご講演いただきました。水素基本戦略のシナリオとして,現 状から 2030 年断面,そして将来の展望を示していただき,水素の製造・輸送・利用について,特に輸送におけるアンモニ アの優位性をご説明いただきました。また,水素社会推進法のポイントについて言及されました。

利用技術について、JERA様の碧南石炭火力の混燃や、船舶輸送、国内外のサプライチェーンの展望、およびそれらのロードマップについてもご説明いただきました。アンモニアは、輸送・利用の両側面で実用段階が近いという印象を受けました。

以上, 冒頭の3つは, 低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けての, 国としての取り組み, 中の2件は各企業様の具体的な取り組み, 続いて天然水素資源に関する取り組み, 最後にクリーン燃料アンモニア協会様より, アンモニアに関する 包括的なお話をいただきました。国の施策から始まり, 支援制度, 具体的な取り組み, そして未来への展望と, 低炭素エネ ルギーシステム, 特に水素・アンモニアの, 社会実装に向けて一連のお話であったかと思います。

ここで、一点お知らせがあります。来年3月11日より東京ウェスティンホテルにて、SPEとJAPTの協賛のワークショップ『CCUS and Low Carbon Fuels』が開催されます。国内外のエキスパートが、本講演会に関連した内容を議論する場となっております。万障繰り合わせの上、ご参加いただければと思います。

最後に本講演会でのご講演をたまわりました講演者の方々全員に改めて御礼を申し上げます。また,多くの方々にご参集・ ご視聴いただきましたことにつきましても御礼申し上げる次第です。さらに、ご協賛いただきました各団体にも感謝申し上 げます。最後に、本講演会の開催にご尽力いただいた全ての関係者の皆様に感謝申し上げまして、今回の「まとめ」とさせ ていただきます。皆様、お疲れさまでした。



単一の常設震源 ACROSS を用いたタイムラプス地震探査の取り組み

清水 英彦*^{*,*}・下田 直之**・田中 宏明**・小西 祐作**・ホワイト ドン***・ニッケル エリック****

(Received June 20, 2024; accepted March 11, 2025)

Application of time-lapse seismic technology using a single permanent source ACROSS

Hidehiko Shimizu, Naoyuki Shimoda, Hiroaki Tanaka, Yusaku Konishi, Don White and Erik Nickel

Abstract : Seismic monitoring is an effective reservoir management technique for CO_2 capture and storage (CCS) and enhanced oil recovery (EOR) projects. However, seismic monitoring in onshore fields often faces challenges associated with inadequate repeatability. The possible factors are positioning errors for sources/receivers and changes in near-surface conditions between monitor surveys. Permanent seismic monitoring (PRM) using both stationary sources and receivers can overcome this problem.

JOGMEC has continued to research seismic monitoring using a permanent seismic source (accurately controlled routinely operated signal system: ACROSS) which consists of a rotary eccentric mass and a motor anchored on a concrete foundation. Since 2014, JOGMEC has conducted a demonstration test at the Aquistore CCS site. Four seismic surveys using a single ACROSS and a sparse permanent geophone array were performed from 2016 to 2020.

This paper reports the application of analytical techniques of seismic reflection surveys on reservoir monitoring using a single ACROSS source at the Aquistore CCS site. Before analyzing the real data, we performed a seismic modeling study to validate that our approach can ideally capture time-lapse signal responses. Then, we applied seismic data processing and time-lapse analysis to the four monitor datasets. As a result, seismic responses associated with injected CO_2 were successfully detected around the injection well at the reservoir depth. Compared to the conventional 3D seismic monitoring result acquired using dynamite sources, a similar growth pattern of the seismic responses was observed.

In conclusion, a PRM system using the ACROSS can be an effective approach to realize long-term continuous reservoir monitoring at low cost. It is possible to capture the outline of reservoir changes with just only a single source, but the use of multiple sources is desirable to improve reproducibility. It is also important to pursue establishing techniques that maximize the performance of the ACROSS.

Keywords : permanent seismic source, rotary seismic source, seismic reservoir monitoring, time-lapse analysis, CCS, EOR, Aquistore CCS site

1. 序 論

Carbon dioxide capture and storage (CCS) や enhanced oil recovery (EOR) の操業において、タイムラプス(繰り返し)地震探査による貯留層モニタリングは有効な技術手法として認知されており、さまざまなフィールドで適用されている (Chadwick *et al.*, 2010; Pevzner, 2021; Harvey *et al.*, 2022)。本技術を通じた貯留層内の流体移動や圧力変化といった貯留層性状の把握によって、CCS分野では CO₂

の漏洩監視・貯留層 / 遮蔽層の健全性評価・断層リスク評価などによるリスクマネジメントや圧入開発計画の最適化による圧入効率向上とコスト削減, EOR分野では開発計画最適化による資源回収率向上や開発コスト削減が可能である。

ここで地震探査による貯留層モニタリングの事例は,海 上調査に対し陸上調査によるものは少ない。その主な要因 として,陸上調査のデータの品質や再現性が相対的に低い ことが挙げられる。Pevzner *et al.* (2011) は陸上における 繰り返し地震探査の再現性に関する研究を通じて,表層環 境の変化が陸上調査では大きく,データの品質に大きく影 響することを指摘している。White *et al.* (2015) は陸上で の貯留層モニタリングにおける再現性の向上に,受振器を 地表下に常設する方式が寄与することを示した。このよ うな受振器や震源装置を固定設置する permanent reservoir

^{*} 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 JOGMEC (現 石油 資源開発株式会社 JAPEX)

^{**} 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 JOGMEC

^{****} カナダ天然資源省地質調査 Geological Survey of Canada, GSC

^{*****} カナダ石油技術研究所 Petroleum Technology Research Centre, PTRC * Corresponding author: E-Mail: hidehiko.shimizu@japex.co.jp

monitoring (PRM) システムでは高い再現性が期待できる ほか、1回あたりのデータ取得費用を低減できる可能性も ある。

JOGMECでは、精密制御常設震源(accurately controlled routinely operated signal system: ACROSS)により発震を 行う PRM システムに着目し、これまで各種の研究を進 めてきた(中務ほか、2019; Shimoda *et al.*, 2019; 市川ほ か、2022; 清水ほか、2022)。ACROSS は地表固定式の震 源であることに加えて、偏心錘(おもり)を高精度に回 転制御することで、再現性の高い発震波形を長期間にわ たって安定的に伝搬することができる。本震源を用いた実 証試験を 2014 年からカナダ・サスカチュワン州に位置す る Aquistore CCS site にて実施している。本サイトでは常 設した地表埋設ジオフォンを用いて、ダイナマイト震源と ACROSSによる繰り返し地震探査がそれぞれ行われている。

本研究では、Aquistore CCS site で単一の ACROSS と地 表埋設ジオフォンを用いて取得された繰り返し地震探査 データに対する反射法データ処理およびタイムラプス解析 を通じて、本技術手法の有効性について検討した。タイ ムラプス解析において、調査間の再現性評価指標として normalized root mean square (NRMS : Kragh and Christie, 2002)を用いた。実データ解析の前段階として、数値シミュ レーションから本観測手法の貯留層モニタリングに関する 実現可能性を検討した。その後、ACROSS 発震の再現性に ついて、フィールド発震記録の比較や反射法データ処理適 用結果を通じて評価した。また、本処理結果とダイナマ イト震源により取得された既往結果 (Movahedzadeh *et al.*, 2021)との比較を通じて、CO₂ 圧入に伴う応答変化の検出 の可能性について検討した。最後に、ACROSS による貯留 層モニタリングの有効性と課題について考察した。

2. ACROSS と実証試験の概要

2.1 ACROSS

ACROSS は名古屋大学によって開発された地表固定式の回転型震源の1つであり(熊澤・武井, 1994),主に

地震学の分野などで多くの活用事例が報告されている (Yamaoka et al., 2001 ; Ikeda et al., 2017 ; Tsuji et al., 2018 and 2022)。本震源は偏心錘とモーターから構成される。 モーター制御には電圧や周波数を制御するインバーター装 置を導入することで正確な弾性波の出力を可能にしてい る。また、10年以上の運転実績(Tsuji et al., 2018)や14 か月間の連続稼働実績(生田ほか, 2001)があり、長期連 続モニタリングに適した高い再現性と堅ろう性を有する。 高い再現性を活用して、時計回りと反時計回りの発震記録 を加算または減算することで、上下方向または水平方向 に加振した波動場を仮想的に合成することが可能である (Fig. 1(a))。本震源の課題として、製造および設置に掛か る初期費用が高いため多点配置が難しいことが挙げられて いる。そのため、少ない発震点数で対象とする地下の物性 変化を検出できる手法を確立することが ACROSS による 貯留層モニタリングにおいて重要である。

本研究で開発製造および運用した ACROSS はモーター と偏心錘(Fig. 1(b))から構成される。フィールドではプ レハブ小屋内のコンクリート基礎と接合されている(Fig. 1(c))。偏心錘の総重量は約92 kg,シャフトからの重心 距離は約4.3 cm であることから,偏心モーメントは約4 kg・m である。発震可能な周波数帯域は1~50 Hz であ るため,重量,偏心モーメントと角速度の二乗で計算さ れる理論的な発生力は、5 Hz で 3.924 kN,25 Hz で 98.23 kN,50 Hz で 392.4 kN である。参考までに、50 Hz におけ る発生力は世界最大級の陸上バイブレーター(INOVA 社 AHV-V TITAN)の最大起振力(356 kN)を上回る(INOVA 社ウェブサイト,2021)。

ACROSS の発震では、周波数変調(FM 変調)を利用し た特殊なスウィープ信号が用いられる。偏心錘をこのス ウィープ信号に従い回転させることで弾性波を発生させ る。一定時間間隔で正確に回転させることで,シグナル成 分は周波数領域においてスウィープ時間 T の逆数で表さ れる周波数間隔に出現する。詳細については気象庁気象 研究所による技術報告(2011)を参照されたい。例えば、



Fig. 1 Schematic mechanism and photos of ACROSS

(a) shows the schematic mechanism to generate vertical/horizontal force by summing/subtracting the seismic data of ACROSS clockwise and anti-clockwise rotation. (b) is the photo of an eccentric mass under the manufacturing stage. (c) is the photo of an installation site in another field. The eccentric mass is laid on the basement under the coupler.



Fig. 2 Consecutive FM modulation sweeps and the frequency data by discrete Fourier transform (a) is time series data consisting of two consecutive 400-second FM modulation sweeps. (b) is the instantaneous frequency corresponding to (a). (c) is the frequency spectrum at 8 Hz where this data is arranged at 1/800 Hz intervals, with signal components (blue circles) appearing at frequencies spaced 1/400 Hz apart, and noise components (orange crosses) appearing at all other frequencies. (d) is the frequency spectrum in the full range of the signal. As an overall trend, higher frequencies have higher frequency amplitudes.

400 秒のスイープが2つ連続する時系列データに対して離 散フーリエ変換を行うと、1/800 Hz 間隔の離散周波数デー タが得られる。このうち1/400 Hz 間隔にシグナル成分が 出現し、それ以外の周波数にはノイズ成分が出現する (Fig. 2)。

この特性を利用することで、シグナル成分とノイズ成分 を分離することが可能であり、ノイズ強度の逆数をシグナ ル成分の重みづけ重合に用いることで、高い重合効果を得 ることが可能である。さらに、時計回りと反時計回りのデー タの加算処理、入力信号としたパイロットスウィープによ るデコンボリューションと時間領域への逆フーリエ変換を 逐次実施することで、最終的に上下方向に加振したインパ ルス震源に相当する発震波形記録が生成できる。

2.2 Aquistore CCS site

本サイトは、カナダ・サスカチュワン州に位置する地下 に圧入した CO₂ の測定と監視について研究を行っている CCS に関する試験場である。2015 年より 1 本の鉛直井か ら CO₂ の圧入を開始している。現在も圧入が継続されて おり、2024 年 1 月 20 日時点で累積圧入量が 58.5 万トンに 至っている (PTRC ウェブサイト、2024)。対象貯留層は、 深度 3150 – 3350 m 区間のカンブリア紀後期の Deadwood

本サイトでは、CO₂プルームの把握と監視を目的として、
 地表に埋設されたジオフォンや地表や坑内に敷設された光
 コーイバーケーブルを用いた場のにし地震探索エークル

水平な構造を有した帯水砂岩層である。

ファイバーケーブルを用いた繰り返し地震探査モニタリ ングが実施されている(Movahedzadeh *et al.*, 2021)。地表 から深度 20 m に埋設されたジオフォンは圧入井を中心と した 2.5 km 四方のエリアに、東西と南北方向に約 144 m と 72 m の受振間隔で 630 台常設されている(White *et al.*, 2019)。2012 年以降、3 km 四方のエリアに展開されたダ イナマイト震源を用いた三次元地震探査モニタリングが 6 回実施され、貯留層内の CO2 プルームの時空間的な分布 の把握に成功している(Movahedzadeh *et al.*, 2021)。

層およびオルドビス紀の Winnipeg 層から構成されるほぼ

2.3 実証試験概要

JOGMECは、2014年から本プロジェクトに参画してお り、サイト内に設置した1台のACROSSを用いたPRMシ ステムの実証試験を行っている。当初ACROSSは圧入井 から約100m離れた場所に設置して地震探査データ取得を 実施したが、対象貯留層からの反射波に表面波が強く被覆 し解析が困難であることが判明したことから(Nakatsukasa *et al.*, 2017)、2016年に圧入井から南西に約630m離れた



Fig. 3 Acquisition geometry at the Aquistore CCS site The location of the ACROSS source, the injection well, the observation well, and the geophones are indicated by a red star, a pink circle, a light blue circle, and blue crosses, respectively. The CMPs (black dots), calculated at the ACROSS source and the receiver points, cover the injection well and its surroundings.

位置に ACROSS を移設した。Fig. 3 に最終的な観測ジオ メトリを示す。AROSS と地表埋設ジオフォンの共通中点 (common midpoint: CMP) は圧入井とその周辺を網羅して いる。

ACROSS と地表埋設ジオフォンを用いた繰り返し地震探 査として、2016年12月にベースライン調査(累積 CO₂ 圧 入量:約10.4万トン)、2018年3月に1回目のモニタリン グ調査(累積 CO₂ 圧入量:約14.1万トン)、2019年4月 に2回目のモニタリング調査(累積 CO₂ 圧入量:約19.7 万トン)、2020年1月に3回目のモニタリング調査(累積 CO₂ 圧入量:約27.2万トン)が実施されている。

数値シミュレーションによる本観測手法 のフィージビリティ検討

本実証試験の単一の震源と面的に配置された受振観測網 からタイムラプス応答が検出可能であることを確認するた め、この配置を模擬した数値シミュレーションを行った。 音響波動場を仮定した波動方程式に基づいた三次元有限差 分法に基づき合成地震探査記録を作成し、重合前深度マイ グレーションの1つである reverse time migration (RTM) によるイメージング処理と得られた結果に対するタイムラ プス解析を実施した。

数値シミュレーションで使用する P 波速度モデルおよ び密度モデルは、まず圧入開始前の状態を模した水平多層 モデルを CO₂ 圧入前の圧入井で取得された検層データよ り作成した。次に CO₂ 圧入に伴う貯留層内の物性変化を 与えたモデルは、圧入区間にあたる深度 3230 ~ 3250 m に 坑井を中心とする円盤状の領域を設定し、既往の岩石物理 に関する研究(Roach *et al.*, 2015)を参考にした 10%の速 度低下を与えている。ここで実際の ACROSS によるベー スライン調査が CO₂ の累積圧入量が約 10.4 万トンの時点 で実施されていることを考慮し、円盤の半径を 100 m, 200 m とした 2 つのモデルを作成している。また密度モデ ルについては検討を単純化するため、CO₂ 圧入に伴う変化 を与えていない。数値シミュレーションの震源波形は中心 周波数が 30 Hz のリッカーウェーブレットを使用し、CO₂ 圧入前後の合成地震探査記録を計算した(Fig. 4)。

得られた合成地震探査記録に対して、RTM によるイメー ジング処理を実施した。この際、マイグレーション用の速 度モデルは圧入前の P 波速度および密度モデルを利用し た。タイムラプス応答の抽出として、式(1)で計算される normalized root mean square (NRMS; Kragh and Christie, 2002)を用いた。

$$NRMS = \frac{200 \times RMS(a_t - b_t)}{RMS(a_t) + RMS(b_t)}$$
(1)

ここで,
$$RMS(x_t) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{t^2} (x_t)^2}{N}}, a_t, b_t$$
は比較する2つの

記録の $t_1 - t_2$ の区間におけるトレースデータとする。Fig. 5(a)は圧入前と圧入後(半径 200 m)の, Fig. 5(b)は圧入 後記録間(半径 100 m と半径 200 m)の NRMS 値であり, それぞれゲート長は 20 m が使用されている。いずれのケ ースでもモデル間の速度変化領域と高 NRMS 領域はよく 一致する結果が得られている。

本検討から,真の速度構造が既知かつノイズフリーであ る理想的な状況下では、単一の震源であっても対象深度の 速度変化を検出可能であることが明らかになった。ただし、 NRMS 値分布の鉛直方向の解像度は窓サイズの影響によ り水平方向に比べて小さく、高 NRMS 領域の見かけの厚 さは、モデル間の実際の速度変化領域の厚さの2倍程度と なっている。

4. 実データに対する解析

4.1 ACROSS による発震記録

ACROSS の発震では5 Hz から 50 Hz を周波数帯域とし て、ベースライン調査では 800 秒の予備動作と 200 秒のス ウィープ信号を14回分連結した1時間を1セットとして、 時計回りと反時計回りの発震を交互に繰り返した。モニタ リング調査では 1600 秒の予備動作と 400 秒のスウィープ 信号を14回分連結した2時間を1セットとした。各調査 では1~2週間の連続発震作業が実施された。この発震作 業に合わせて、サイト内に面的に配置されたジオフォン観 測網により、2 ms のサンプリングレートで連続観測が実 施された。

観測データの一例として、3回目のモニタリング調査に



Fig. 4 Velocity model and synthetic seismic data used in the simulation study

(a) shows the well logging data (red) from the injection well obtained before the CO_2 injection and the velocity model (blue). (b) shows the baseline P-wave velocity model on a vertical section through the injection well. (c) shows the disk-shaped velocity change with a radius of 200 m applied to the baseline model corresponding to (b). (d) shows the synthetic seismic data calculated from the baseline model. (e) shows the difference of seismic data between the baseline and the monitoring survey with a 200 m radius disk-shaped velocity change. The reflection event that appeared at approximately 1.8 seconds is due to the velocity change at a depth of 3250 m. The heterogeneous amplitude pattern of this event is caused by the offset sorting, which mixes the traces that are not affected by the velocity change.





(a) shows the result with the baseline and the monitoring survey with 200 m radius disk-shaped velocity change, and (b) shows the result with the monitoring surveys with 100 m and 200 m radius disk-shaped velocity changes. The upper part of each panel shows the difference in the P-wave velocity model, and the lower part shows the NRMS amplitude. The left side shows an east-west vertical section through the injection well, and the right side shows a depth slice section that crosses the center of the velocity change indicated by the black line on the vertical section. On the depth slice section, the ACROSS source is indicated by a red inverted triangle, and the injection well is indicated by a pink circle.

おける震源から約25mのオフセット距離に位置するジオ フォンで取得された発震波形記録をFig.6に示す。調査期 間中の波形は非常に類似しており、ACROSSによる発震の 再現性が高いことが確認できる。

本研究では収録された2日間の連続データに対してデー タ処理およびタイムラプス解析を実施した。連続データか ら2スウィープ連結させたデータの切り出し作業を行った のち,2.1節で記述した処理を逐次実施することで,発震 波形記録を作成した。

各調査のフィールド発震記録(Fig. 7(a) - (d))を比較 すると、各調査で共通してノイズレベルは小さく、反射波 は互いに類似するが、表面波は調査間で異なる様相を示す。 各調査の全トレースから計算した周波数スペクトルの平 均(Fig. 7(e))は、発振記録作成の段階でデコンボリュー ションを施しているため、5~50 Hzの発震周波数帯域に おいておおむねフラットな特徴を有しているが、5~20 Hzの帯域では表面波の影響により相対的に高いだけでな く各調査の差異が大きい。ベースライン調査と各モニタ リング調査との差分記録(Fig. 7(f) - (h))において、反射 波イベントの振幅は極めて小さく、調査間の再現性が高い ことが示唆される。しかしながら、表面波は差分記録にお いて顕著であり再現性が低い。圧入対象の貯留層からの反 射波は往復走時約1.85 秒に想定されるが、CO2 圧入に伴 う反射波イベントが表面波の影響を受けた領域に含まれる 場合,振幅値の変化を検出することは困難であるため,表 面波の抑制が極めて重要である。



Fig. 6 Example of field records obtained during the third monitoring survey

This shows time series data recorded during the ACROSS clockwise rotation, obtained by a geophone located at an offset distance of about 25 m from ACROSS. The vertical axis shows the observation time from the start of each sweep, and the horizontal axis shows the start time of each sweep.



Fig. 7 Comparison of field seismic records from each survey

(a) shows the seismic record of the baseline survey (BL), (b) to (d) show the ones of the first to third monitoring surveys (M1 to M3), where the seismic data is sorted by offset distance. (e) shows the average frequency spectrum calculated from all traces of the seismic records of each survey. (f) to (h) show the difference between the baseline survey and each monitoring survey.

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

4.2 反射法データ処理

震源関数や収録時期などに起因する調査間差異の低減や 対象貯留層内の CO₂ 圧入に伴う貯留層内の物性変化の抽 出を目的として、フィールド発震記録に対して反射法デー タ処理を実施した(Fig. 8)。それぞれの調査で共通して観 測されたトレースペアのみをデータ処理の対象としたた め、各調査における有効トレースペアは516 組であった。 処理パラメータの一部は、本サイトで過去に実施されたダ イナマイト震源を用いた繰り返し地震探査の解析(Roach *et al.*, 2017)を参考にした。処理ステップごとの処理およ びパラメータの選択は基本的に、ベースラインと各モニタ リング調査間の往復走時0.7 ~ 2秒の区間における NRMS 値を計算し、最も低下するものを採用した。NRMS 値の 計算では、イメージング処理適用前の段階では normal moveout (NMO)補正後の発震記録を、イメージング処理 適用後は三次元地震探査ボリュームを対象とした。

反射法データ処理の最初の段階として、表層(主に震源 側)および標高補正を行った。本データセットには同一地 点の発震記録しかないため、震源近傍の表層速度および静 補正量は各発震記録の初動値から推定した。各調査の発震 記録から読み取った同一受振点の初動値はほぼ同一の値 を示し、解析の結果、表層速度と静補正量はそれぞれ800 m/sと32 msとなった。受振点近傍の表層に対する静補正 について、NMO補正後の発震記録を入力として0.8 ~ 1.4 秒区間の反射波イベントがフラットになるように各調査お よび各受振点に対する残差静補正値を計算した。この際、 卓越する表面波や強振幅ノイズを抑制するため一時的な ローカットフィルター(遮断周波数:20 Hz,通過周波数: 25 Hz)を適用した。

対象貯留層からの反射波イベントに被覆する表面波の 抑制として、1~25 Hz の周波数帯域に対して見かけ速度 800 m/s以下の線形ノイズを除去する FX 速度フィルター をオフセット距離でソートした発震記録に対して適用し た。また、残存する表面波を抑制するためにローカットフィ ルターを適用した。

地表と観測機器のカップリングに起因する調査間の差



Fig. 8 Processing flow

異を低減するため, surface consistent amplitude correction (SCAC)を適用した。NMO 補正および幾何発散補償適用 後の発震記録の1~1.8 秒区間を対象として,震源・受振・ CMP・オフセットの4成分に分解し,各調査の震源・受 振成分のスケーリング値を推定した。位相補正を目的とし て, surface consistent deconvolution の適用を試みたが,調 査間の差異が小さくなる傾向が確認できなかったことから 不採用とした。

調査間の再現性が低いデータを除外するため、ベースラ インと各モニタリング調査間の NRMS 値が 90%を超える トレースペアを検索し、各調査のトレース数を均一にする ため全調査から削除した。除外したトレースペアは 154 組 で、それぞれの調査で共通して観測された有効トレースペ ア(516 組) に対して3割程度であった。また、震源近傍 の強振幅トレースを除去するインナーミュートを適用した。

Fig.9にマイグレーション処理直前までの一連の処理適 用前後の発震記録例を示す。一連の前処理適用により,表 面波,強振幅ノイズおよび調査間の差異が大きなトレース が除去され,調査間の再現性が向上した。再現性評価とし て,Fig.10およびFig.11に,前処理適用前後の発震記録 におけるベースライン調査と各モニタリング調査に対する NRMS 値の頻度分布と空間分布を示す。頻度分布から前 処理により全体的に NRMS 値は低下し,ベースライン調 査と各モニタリング調査間の再現性が向上したことが確認 できる。空間分布から震源近傍に円環状に現れる表面波ノ イズや調査間の差異が大きなトレースが除外されたことが 確認できる。

イメージング処理では、キルヒホッフ法による三次元 重合前時間マイグレーション (pre-stack time migration; PSTM) を実施した。マイグレーション用の速度モデル はダイナマイト震源を用いた繰り返し地震探査の解析 (Roach et al., 2017) で推定された PSTM 速度モデルを用い た。イメージング処理後の地震探査ボリュームの周波数ス ペクトルを計算すると卓越周波数は約20Hzで高周波成分 は相対的に低くなっており、解像度が不足したことで後述 の解析に困難を要した。そこで、高周波成分を回復させる ため、位相情報を保存させながら5~50Hzの周波数振幅 スペクトルをフラットに近づける "spectral shaping" 処理 を適用した。一方で、シグナル周波数帯域の両端付近にお けるノイズ成分が相対的に大きくなり、イメージング結果 の S/N が低くなったため,バンドパスフィルターを適用 することでノイズ低減を行った。これらの処理適用により, 位相回転を招くことなくイメージング結果の解像度が向上 した。

各モニタリング調査とベースライン調査との再現性を向 上させるために、往復走時1550~1800 ms 区間をターゲッ トとして、ベースライン調査の記録に合うようなマッチン グフィルターを設計し、各モニタリング調査の全データに 適用した。過度にデータを合致させることを防ぐため、各 調査に対して単一のフィルターを設計した。最終処理とし て、既往結果(Movahedzadeh *et al.*, 2021)との対比がで



Fig. 9 Comparison of seismic records before and after preprocessing

(a) and (b) show the field seismic records of the baseline and the third monitoring survey, respectively. (c) shows the difference between these data. (d) to (f) show the seismic records after preprocessing corresponding to (a) to (c). By applying a series of preprocessing, surface waves, strong amplitude noise (red arrows), and traces with large differences between the surveys (green arrows) were removed.

きるように, 圧入井の音波検層データから作成した合成地 震探査記録との対比を行った。主要な反射波イベントが対 応するようにイメージング結果に対して 14 ms 上方にタイ ムシフトを行った。

各処理ステップの平均 NRMS 値の推移を Fig. 12 に示す。 原記録の段階において、ベースライン調査と 2 回目のモニ タリング調査間では再現性が高いことから、他のモニタリ ング調査と比べて NRMS 値が卓越して低かった。反射法 データ処理を通じてベースライン調査と各モニタリング調 査の NRMS 値はおおむね同等の値を示し 40%以下になっ た。各調査の最終処理結果のデータ品質および再現性はお おむね同等レベルになったことが示唆される。

4.3 タイムラプス解析

CO₂ 圧入に伴う貯留層内の物性変化を検出することを目 的として,4.2 節の反射法データ処理により得られた各調 査のイメージング結果に対してタイムラプス解析を実施し た。ベースライン調査と各モニタリング調査のデータを比 較するため,両者の差分と NRMS 値を計算した。NRMS 値の計算では,各トレースペアの全サンプルに対して時間 ウィンドウ長を14 ms に設定した。ベースライン調査と3 回目のモニタリング調査の比較結果を Fig.13 に示す。両 者のイメージング結果は類似し,差分記録においても主要 な反射イベントは打ち消されていることから,データの再 現性が高いことが示唆される。CO₂ 圧入に伴う貯留層内の



Fig. 10 Repeatability evaluation for the field records (a) to (c) show the histogram of NRMS values calculated from all traces in the baseline survey (BL) and each monitoring survey (M1 to M3). (d) to (e) show the spatial distribution of the NRMS values of each trace projected onto the CMP position. The location of the ACROSS source, the injection well, and the observation well are indicated by a red triangle, a pink square, and a black star, respectively.



Fig. 11 Repeatability evaluation for the records after preprocessing

The layout is the same as in Fig. 10.



Fig. 12 Mean NRMS values in each processing step for baseline and each monitoring dataset

物性変化は差分記録では不明瞭であるものの,NRMS 振幅 では圧入井付近にアノマリーとして強調されている。

本手法による CO₂ 圧入に伴う応答変化検出の可能性を 検討するために,本研究のタイムラプス解析結果とダイナ マイト震源による既往結果 (Movahedzadeh *et al.*, 2021) を比較した (Fig. 14)。本研究におけるベースライン調査

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)



Fig. 13 Comparison of imaging results between the baseline and the third monitoring survey

(a) and (b) show the imaging results of the survey and third monitoring survey, respectively. (c) and (d) show the difference and NRMS amplitude calculated with those data. The upper part of each panel shows the east-west vertical section through the injection well, and the lower part shows the time slice section at the two-way travel time of 1864 ms. In each upper section, the injection well is shown with a pink line, the upper and lower limits of the target reservoir are shown with black dashed lines, and the travel time of the time slice section is shown with a red dashed line. In each lower section, the location of the ACROSS source, the injection well, and the observation well are indicated by a red star, a pink square, and a black circle, respectively. Additionally, a circle with a radius of 500 m from the injection well is shown with a red line and the projected line of the east-west vertical section in the upper part is also shown with a green line.



Fig. 14 Comparison of the time-lapse analysis result of this study with the existing analysis result (Movahedzadeh *et al.*, 2021) (a) shows the NRMS values between the baseline survey (BL) and each monitoring survey (M1 to M3) as the final result of this study. (b) shows the result of the existing analysis (Movahedzadeh *et al.*, 2021). The result of the first monitoring survey in this survey revealed high NRMS values in the southeast of the injection well. These high values appear to correspond to the location (red arrow) where the RMS value disappeared in the existing result. In the result of the third monitoring survey in this study, high NRMS value extending to the northwest and southeast of the injection well has a similar trend to the previous results (yellow arrow). On the other hand, in the northeast of the injection well, the lateral growth pattern of the previous results is not consistent with this study (green arrow).

時期は既往結果の2回目のモニタリングと時期が対応する ため、単純な比較ができないことに留意する必要がある。 本解析結果において, 圧入対象層内の深度に高 NRMS 値 が圧入井付近に検出されており、CO2 圧入が進むにつれて 南東および北西方向に伸展する傾向がみられる。また、本 研究の1回目のモニタリング調査に対する結果では圧入井 の南東部に高 NRMS 値(Fig. 14 赤矢印)が検出されてい るが、既往結果では対象の調査時期間で RMS 値が消失し た箇所と対応しているようにみえる。本研究の3回目のモ ニタリング調査に対する結果では高 NRMS 値が圧入井の 北西部と南東部に伸展するような特徴(Fig. 14 黄矢印) がみられるが、既往結果と同様の傾向である。一方で、圧 入井北東部において既往結果では CO2 圧入が進むにつれ て進展する特徴がみられるが、本研究結果では検出できて いない(Fig. 14 緑矢印)。以上のように、本研究結果と既 往解析結果とは高い関連性が示唆されるものの相違も認め られた。本観測および解析手法によって CO2 圧入に関連 した応答変化の検出はおおむねできているが、その検出精 度は均一ではない可能性がある。

5. 考 察

本研究における数値シミュレーションおよび実データ 解析に基づく既往結果との比較を通じて、わずか1台の ACROSS による PRM システムによって貯留層モニタリン グが実現できる可能性が示されたと考える。PRM システ ムでは連続的な観測が可能になり、従来式の繰り返し地震 探査が不要となることで、長期の貯留層モニタリングにお いては総費用を低減できる。

一方で、本観測手法では震源の配置が限定されることに 起因して、①イメージング範囲が限定される、②イメージ ング結果にひずみが生じる、③複数の発震記録を重合する ことによる S/N 向上が得られないなどの欠点がある。こ れらの問題は震源の追加により軽減されると考えられる。

本研究で用いた ACROSS の発震可能な周波数帯域は1 ~50 Hz である。対象の規模や深度によって必要な周波数 帯域は異なるが,他のフィールドへの適用(例えば,浅部 貯留層を対象としたモニタリング)を考慮すると,より高 周波数側の帯域を拡張することが望ましいと考える。実 データ解析でも同様に,震源の改良による信号周波数帯域 の拡張によって,より詳細な結果が得られることが期待で きる。

各調査の発震記録に対する単純な比較からは CO₂ 圧入 に伴う反射波の振幅の変化を把握することができなかっ た。最終解析結果で異常がみられた地点の CMP に属する トレースの位置を把握し、そのトレースを発振記録上で特 定するなどの比較・検討が今後必要である。

本研究で得られたタイムラプス解析結果は既往結果と比 較して (Fig. 14), 基本的には調和的な結果であったものの, 整合しない箇所もあった。既存の繰り返し地震探査データ を再解析し,本研究の期間に近い差分記録を作成や,デシ メーションテストを通して比較・検討することで,品質低 下の原因追求や, 観測点配置の最適化を通してコスト低減 に役立つ可能性がある。

本研究では、回転型震源による観測記録から上下方向に 加振したインパルス震源に相当する発振記録を生成し、 反射法データ処理技術によって CO₂ 圧入に伴う貯留層内 の物性変化の抽出を試みた。本解析アプローチ以外にも ACROSS は回転型震源の特性や高い再現性を効果的に活用 した解析手法を検討する余地がある。例えば、水平方向(S 波バイブレーターに相当)や任意の方向に加振した発振記 録の合成が可能である。Tsuji *et al.* (2022)では再現性を 活用して、地震波減衰の時間変化を誤差を含めて推定して いる。今後、継続した研究を通じた最適なモニタリング技 術の確立することが重要と考える。

6. 結 論

本研究では Aquistore CCS site における実証試験データ の解析を通じてACROSSの有効性と課題について検討し, ACROSS を組み入れた PRM システムが貯留層の長期にわ たる連続的モニタリングを安価に実現する有効な技術アプ ローチになり得ることを確認した。本実証試験を模擬した 数値シミュレーションからは、理想的な状況下では単一の ACROSS で対象深度の物性変化を地震探査記録から検出可 能であることが示された。実証試験データからは ACROSS の PRM システムにおける反射波イベントの再現性が極め て高いことが確認された一方、震源配置が限定的であるた め,表面波の影響を強く受ける場合があり,観測点の配置 やノイズ抑制が極めて重要であることが判明した。データ 処理では調査間の差異を低減させるため、NRMS 値により 効果を検証しながら進める品質管理法が効果的であった。 また、ACROSS は1台だけでも貯留層変化の概要を把握す ることが可能であるが、再現性の向上には複数台の使用が 望ましく、この際のモニタリングの品質とコストの最適化 には、既存の繰り返し地震探査データのデシメーションテ ストが有効である可能性について言及した。

最後に、上述した課題に対する継続的な検討だけでなく、 ACROSS 震源の特性を最大限活用した解析技術確立に向け た研究も重要と考える。

謝 辞

本研究は Geological Survey of Canada (GSC) および Petroleum Technology Research Centre (PTRC)の協力の下 でデータ取得を実施している。2名の査読者からいただい たコメントおよび編集担当者との議論は原稿の改善に大い に役立った。ここに記して謝意を表する。

引用文献

Chadwick, A., Williams, G., Delepine, N., Clochard, V., Labat, K., Sturton, S.,...Rossi, G., 2010: Quantitative analysis of time-lapse seismic monitoring data at the Sleipner CO₂ storage operation. *The Leading Edge*, **29** (2), 170–177, doi: 10.1190/1.3304820.

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

- Harvey, S., Hopkins, J., Kuehl, H., O'Brien, S., and Mateeva, A., 2022: Quest CCS facility: Time-lapse seismic campaigns. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **117**, doi: 10.1016/j.ijggc.2022.103665.
- 市川 大・北脇裕太・下田直之・中山貴隆・加藤文人, 2022:固定式震源 ACROSS を活用した DAS-VSP 方式に よる貯留層モニタリングシステムの実証試験成果と今後 の展望. 石技誌, 87(1), 27–39, doi: 10.3720/japt.87.27.
- Ikeda, T., Tsuji, T., Takanashi, M., Kurosawa, I., Nakatsukasa, M., Kato, A.,...Roberts, B., 2017: Temporal variation of the shallow subsurface at the Aquistore CO₂ storage site associated with environmental influences using a continuous and controlled seismic source. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122** (4), 2859–2872, doi: 10.1002/2016JB013691, doi: 10.1002/2016JB013691.
- 生田領野・宮川幸治・雑賀 敦・森口賢治・國友孝洋・山 岡耕春,2001:精密制御定常震源システム (ACROSS) による地震波速度の長期連続観測.地球惑星科学関連学 会合同大会予稿集,Su-POO1.
- INOVA 社ウェブサイト, 2021: AHV-V TITAN Datasheet. https://dlcvtcw7p7ix4u.cloudfront.net/images2/ downloads/AHV-V_TITAN_2021-03-30-220054.pdf?mtime=2 0210330170054&focal=none (accessed 2024/06/17).
- Kragh, E., and Christie, P., 2002: Seismic repeatability, normalized rms, and predictability. *The Leading Edge*, 21 (7), 640–647, doi: 10.1190/1.1497316.
- 気象庁気象研究所, 2011:技術報告第63号, doi: 10.11483/mritechrepo.63.
- 熊沢峰夫・武井康子,1994:精密制御音波放射による能動 的地下構造常時モニター手法の研究その1目的と原理. 日本地震学会秋季大会講演要旨,158.
- Movahedzadeh, Z., Shokri, A. R., Chalaturnyk, R., Nicklel, E. and Sacuta, N., 2021: Measurement, monitoring, verification and modelling at the Aquistore CO₂ storage site. *First Break*, **39**(2), 69–75, doi: 10.3997/1365-2397.fb2021013, doi: 10.3997/1365-2397.fb2021013.
- 中務真志・加藤文人・下田直之・伴 英明・ホワイトドン・ ニッケルエリック・デーリートーマス,2019:アクイス トア CCS 試験場における光ファイバーセンシングおよ び常設型震源アクロスを用いた地震探査データ取得.石 技誌,84(1),32-41,doi:10.3720/japt.84.32.
- Pevzner, R., Isaenkov, R., Yavuz, S., Yurikov, A., Tertyshnikov, K., Shashkin, P., Barraclough, P., 2021: Seismic monitoring of a small CO₂ injection using a multi-well DAS array: Operations and initial results of Stage 3 of the CO₂CRC Otway project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **110**, doi: 10.1016/j.ijggc.2021.103437.
- Pevzner, R., Shulakova, V., Kepic, A., and Urosevic, M., 2011: Repeatability analysis of land time - lapse

seismic data: CO_2CRC Otway pilot project case study. *Geophysical prospecting*, **59**(1), 66–77, doi: 10.1111/j.1365-2478.2010.00907.x.

- PTRC ウェブサイト, 2024, "PTRC'S AQUISTORE PROJECT IS AWARDED APEGS' ENVIRONMENTAL EXCELLENCE AWARD", https://ptrc.ca/media/whats-new/ptrcsaquistore-project-is-awarded-apegs-environmentalexcellence-award (accessed 2024/06/17).
- Roach, L. A., White, D. J., and Roberts, B., 2015: Assessment of 4D seismic repeatability and CO₂ detection limits using a sparse permanent land array at the Aquistore CO₂ storage site. *Geophysics*, **80** (2), WA1-WA13, doi: 10.1190/geo2014-0201.1.
- Roach, L. A., White, D. J., Roberts, B., and Angus, D., 2017: Initial 4D seismic results after CO_2 injection start-up at the Aquistore storage site. *Geophysics*, **82** (3), B95-B107, doi: 10.1190/geo2016-0488.1.
- 清水英彦・北脇裕太・下田直之・中山貴隆・田中宏明・小 西祐作,2022:アクイストア CO₂ 圧入サイトにて取得 された ACROSS と地表埋設ジオフォンを用いた四次元 地震探査データ解析. 令和4年度エネルギー・金属鉱物 資源機構エネルギー事業本部技術年報,14-17.
- Shimoda, N., Nakatsukasa, M., Ichikawa, M., Kato, A., and White, D. J., 2019: Continuous CO₂ reservoir monitoring over ten days using a permanent seismic source. *AGU Fall Meeting Abstracts*, S34B-06.
- Tsuji, S., Yamaoka, K., Ikuta, R., Kunitomo, T., Watanabe, T., Yoshida, Y., and Katsumata, A., 2018: Secular and coseismic changes in S-wave velocity detected using ACROSS in the Tokai region. *Earth, Planets and Space*, **70**(1), 1–10, doi: 10.1186/s40623-018-0917-2.
- Tsuji, S., Yamaoka, K., and Ikuta, R., 2022: Temporal change in seismic wave attenuation using highly stable vibration sources. *Earth, Planets and Space*, **7**4(1), 15, doi: 10.1186/ s40623-022-01570-0.
- White, D., Harris, K., Roach, L., and Robertson, M., 2019: 7 years of 4D seismic monitoring at the Aquistore CO₂ Storage Site, Saskatchewan, Canada. *Expanded Abstracts* of the 89th SEG Annual International Meeting, 4918–4922, doi: 10.1190/segam2019-3216776.1.
- White, D. J., Roach, L. A., and Roberts, B., 2015: Timelapse seismic performance of a sparse permanent array: Experience from the Aquistore CO₂ storage site. *Geophysics*, 80 (2), WA35-WA48, doi: 10.1190/geo2014-0239.1.
- Yamaoka, K., Kunitomo, T., Miayakawa, K., Kobayashi, K., and Kumazawa, M., 2001: A trial or monitoring temporal variation of seismic velocity using an ACROSS system. *Island Arc*, **10** (3–4), 336–347, doi: 10.1111/j.1440-1738.2001.00332.x.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)81 ~ 84 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 81~84



BP/EI 統計から見た中国における再生可能エネルギー事業の現状

鍋谷 淳'

(Received November 6, 2024 ; accepted February 12, 2025)

Overview for the current status of renewable energy projects in China based on the BP/EI Statistical Review of World Energy

Atsushi Nabetani

Abstract: BP/EI statistics provide data in Excel, and various charts can be created according to the purpose based on the data. So, it can be said that it is an effective tool for reviewing the trends of renewable energy businesses around the world. This time, the author focused on China and gave an overview. As a result, it became clear that we need to pay close attention to whether China's true intention is to pursue decarbonization and renewable energy, or to sell Chinese-made renewable energy facilities in the global market. Although China has declared net-zero greenhouse gas emissions by 2060 and is strongly promoting renewable energy, it should be noted that carbon dioxide emissions have not decreased in China, where coal is still the main source of power generation.

Keywords : primary energy consumption, coal consumption, carbon dioxide emission, electricity generation by fuel, renewable energy

1. はじめに

BP が 1952 年以来, 2022 年まで公表してきたいわゆ る BP 統計(BP statistical review of world energy)は 2023 年以降, Energy Institute(EI)に移管され, EI statistical review of world energy として公表されるようになったが, 本文では,これまで石油業界において BP 統計として周知 され親しまれてきた経緯もあるので,拙著では 2024 年公 表の当該統計資料も BP 統計または BP/EI 統計と呼ぶこと にした。今回,その統計資料に基づいて中国の再工ネ(再 生可能エネルギー)事業の現状について概観した。なお, 以下に示す TWh は 10¹² wh (terawatt-hours)を, MM は 百万を意味している。

2. 中国の二酸化炭素排出量の推移と現状

中国の二酸化炭素排出量は,経済成長に伴って21世紀 に入って急激に増加し,2005年に米国を抜き世界第1位 となった。2023年現在の二酸化炭素排出量は米国の約2.5 倍である(図1)。

UNFPA (国連人口基金: United Nations Population Fund) が発表した世界人口白書 (2024) によると、2024 年の推計値で、中国の人口は14.252 億人。米国の人口は 3.418億人だから、1人当たりの二酸化炭素排出量に関しては、中国は米国の半分程度であるものの、中国が世界有数の二酸化炭素排出国である事実は否定できない。中国の二酸化炭素排出量の急増は、中国における近年の経済成長および一次エネルギー消費の急増(図2)とそれに

呼応するように急増する石炭消費(図3)に関係して いることは明らかである。中国の2023年の石炭消費量は 91.94 エクサジュール(Exajoules;エクサは10¹⁸を意味する) に達しており、世界第2位のインドの約4倍,世界第3位 の米国の約11倍におよぶ。

当時の先進国の温室効果ガス6種の合計排出量を1990 年に比べて少なくとも5%削減することを目標とした「京 都議定書」(1997年12月11日に署名され2005年2月16 日に発効;United Nations, 1998)には中国は途上国とされ 参加しなかったが、産業革命前からの世界の平均気温上昇 を期限は設けないものの2℃未満に抑えるとする2015年 12月に採択された「パリ協定」(United Nations, 2015)に は参加している。そのため中国にも二酸化炭素の排出量を 抑える努力が求められている。中国政府は、2060年に温 室効果ガス排出の実質ゼロを宣言した。しかし、今中国が 行っていることは、ペースが多少落ちたとはいえ、相変わ らずの石炭火力発電所の新設である。エネルギー消費が増 大するなかで、安価かつ安定供給可能な石炭を離れること は難しいのが現状である。

[†] Corresponding author : E-Mail : maryline.honshupref-7561ok@s8.dion.ne.jp



MM tonnes Historical Carbon Dioxide Equivalent Emissions from Energy, Process Emissions, Methane, and Flaring

BP/EI 統計(2024)に基づいて筆者作成。CIS は Commonwealth of Independent States の略。



BP/EI 統計(2024)に基づいて筆者作成

3. 中国の再エネ事業の現状

2023年の中国の燃料別電力源の構成を見ると、やはり 石炭が多い(全体の 60.85%)のであるが、石油天然ガス は意外に少なく(計 3.27%)、水力(12.96%)と風力と太 陽光発電を主とするその他再エネ(18.32%)が多いこと に気づく(図 4)。石油天然ガスは電力源としてではなく 燃料源として多く使われているのだろう。

中国は BYD を初めとする自動車製造企業が電気自動車 (electric vehicle: EV)の開発と世界的普及に力を入れて いるが、EV に供給する電気の調達が課題である。現状の ように石炭が電力源の中心である以上、EV といえども二 酸化炭素の排出減少に繋がらないからである。その意味で、 電力源に占める再エネの割合を増やす努力が重要であり, 実際に中国ではその成果が表れている(図5)。その成果は, 日本の電力源に占める再エネの割合の少なさと比べると一 目瞭然である。2023年における日本の再エネによる発電 量(223.5 TWh)は中国(2894.1 TWh)の7.7%にすぎない。

中国の風力,太陽光発電設備導入量は共に世界第1位で あり,ある程度,脱炭素と再エネへの努力が見てとれる。 広大な国土を利用した太陽光発電と風力発電の成果が表れ ていると見ていいだろう。

しかし、そこに見え隠れするのは、世界のエネルギー供 給設備が再エネに移っていけば、おのずと価格競争力のあ る中国製設備が買われ、中国がエネルギーの世界で覇権を 得ることができるとの中国の戦略である。中国の本音は脱



図3 土安国の石灰消賀重の推移 BP/EI統計(2024)に基づいて筆者作成



因4 2023 中の中国の燃料加電力構成 BP/EI統計(2024)に基づいて筆者作成

炭素と再エネの追求なのか,世界市場における中国製再エ ネ設備の売り込みなのか,我々は今後注視していく必要が あるだろう。

4. まとめ

BP/EI 統計は Excel でデータを提供しており、そのデー タを基に目的に応じて種々の図表を作成することができる ため、世界の再エネ事業の動向について概観するための有 効なツールといえる。今回は中国に絞ってその概観を行っ た。その結果、中国の本音は脱炭素と再エネの追求なのか、 世界市場における中国製再エネ設備の売り込みなのか、 我々は注視していく必要があるであろうことが分かった。 2060年に温室効果ガス排出の実質ゼロを宣言し再エネを 強力に進める中国であるが、依然として石炭を主たる発電 源とする中国で二酸化炭素排出量が減っていない現実を注 目すべきであろう。



図5 主要国の再エネ発電量の推移 BP/EI 統計(2024)に基づいて筆者作成

謝 辞

INPEX は近年,主たる収益源である石油天然ガスの探 鉱開発のみならず再エネ事業にも力を入れている。筆者は INPEX 在籍(1981-2021年)当時,再エネ事業に関わるこ とがなかったが,再エネ事業の責任者であった石井義郎元 常務執行役員から再エネに関わるさまざまな知見を得るこ とができた。この機会に石井氏に対して感謝の意を表する。

引用文献

- Energy Institute, 2024: Statistical Review of World Energy, https://www.energyinst.org/statistical-review (accessed 2024/07/01).
- United Nations, 1998: KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, https://unfccc.int/resource/docs/convkp/ kpeng.pdf (accessed 2024/08/25).
- United Nations, 2015: ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT, https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/ 109r01.pdf (accessed 2024/09/15).
- UNFPA, 2024: State of World Population 2024: Interwoven Lives, Threads of Hope, https://www.unfpa.org/sites/ default/files/pub-pdf/swp2024-english-240327-web.pdf (accessed 2024/10/10).

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月)85 ~ 92 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 85~92



多孔質岩石の物性*

西澤 修**.*

(Received October 8, 2024; accepted February 13, 2025)

Physics of porous rocks

Osamu Nishizawa

Abstract: Immiscible two fluids that consist of wetting and nonwetting fluids against minerals are valuable for understanding the subsurface porous reservoirs. The presentation was related to the following topics:

- 1. The relationship between the P- and S-wave velocity ratio and transport properties of the reservoir sandstones.
- 2. The behavior and physical mechanisms of the immiscible two-fluid flow in the porous sandstones.
- 3. The basic framework of Biot's poroelasticity theory and the essence of the second P-wave.
- **Keywords** : physics of porous rocks, *Vp/Vs*, transport properties, immiscible two-fluid flow, fingering pattern, Biot theory, second P wave

1. 序 論

石油・天然ガス資源の探査・生産とCO₂地中貯留に関 連した多孔質岩石の物性に関連して,以下の3件の話題を 提供した。

- 1. 貯留層を構成する砂岩の P 波とS 波の速度比 Vp/Vs と貯留層岩石の輸送特性の関係。砂岩の Vp/Vs は鉱 物粒子の接触状況を把握する指標として利用できる ため岩石の輸送特性(電気伝導度,浸透率)と関係 している。
- 2. 不混和二相流体の孔隙ネットワーク内流動特性。鉱物に対する濡れ性が異なる不混和二相流体の多孔質岩石における流動は従来の浸透率による解釈だけでは理解できず,ganglion dynamicsと呼ばれる置換型流動が重要なメカニズムとなる。
- 3. Biotの多孔質岩石弾性論の基本的枠組みと第2種P 波の本質。流体を含む多孔質岩石の物性を理解する ためには異なる条件で計測された体積弾性率と孔隙 内流体の体積弾性率の役割を知る必要がある。第2 種P波とよばれるものは孔隙内流体を伝播する圧力

波であることが運動方程式の固有値から導かれる。 以下にこれらの概要を記す。なお,講演内容の一部は修 正の上,別の学会誌にて論文の形で報告する予定である。

2. 貯留層岩石の Vp/Vs と輸送特性について

2.1 石英の特異な弾性的性質と砂岩の Vp/Vs

石英は他の造岩鉱物に比べると特異な弾性定数を持つ。 ランダムに配向した石英結晶から成る多結晶岩石の弾性定 数を計算すると非常に低いポワソン比を示す。ポワソン比 は一軸応力を受けた物質の軸方向に直交する方向のひずみ と軸方向のひずみの比の符号を変えた値である。この値が 小さければ物質は軸応力に直交する方向での膨らみが小さ く、「硬い」ことを意味する。図1は貯留層を構成する砂 岩の石英含有量と Vp/Vs およびポワソン比の関係である (データは Han *et al.*, 2011a, b より)。ばらつきはあるが石 英含有量の増加とともに Vp/Vsやポワソン比が小さくなる。

石英の特異な弾性的性質の原因は Si-O の電子共有結合 の強さが原因である。砂岩に含まれる他の粒状鉱物(主と して長石や炭酸塩)は Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} などの金属元素イオンの周囲に酸素がイオン結合的に配位 する。Si-O 結合だけの石英とイオン結合的な結合を有する 他の鉱物との違いが Vp/Vs とポワソン比に現れる(河村, 1996)。

図2は砂岩を石英含有量と粘土含有量をもとに4種類の グループに分け、封圧60 MPa 孔隙圧5 MPa での Vp/Vs(横 軸)と常圧での孔隙率(縦軸)との関係である。グループ ごとに異なる関係が見られる。

^{*} 令和6年6月4日,令和6年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱 部門シンポジウム「岩石物理学-E&P事業における成果と脱炭素社 会へ向けた新展開」にて講演-This paper was presented at the 2024 "Geophysical Frontiers - Transforming Exploration & Production for Global Sustainability -" held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

^{***} 元・九州大学カーボンニュートラルエネルギー国際研究所 International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER) [†] Corresponding author: E-Mail: epchan85@gmail.com

石英含有量が大きく粘土含有量の小さい砂岩は孔隙率が 高く Vp/Vs が小さい。粘土含有量が増加すると孔隙率は 低くなるが Vp/Vs は多くが 1.7 以下である。他の鉱物の含 有量が増すと多くは Vp/Vs は 1.7 以上となる。これは石英 と他の鉱物との弾性的性質の相違が原因である。孔隙率に は粘土のほかに粒径の淘汰(とうた)度合いも影響すると 考えられ、同じグループで孔隙率の大きい砂岩は粒径の淘 汰が進んでいるのであろう。

鉱物のP波速度は鉱物粒子が接触して構成されるフレームの「硬さ」を反映する。粒子が強く接触するほどフレームは硬くなり, Vpが増加するが, Vsの増加は小さい。よって, Vp/Vs は鉱物粒子間の接触の強さや粒子の固着の強さ



図1 貯留層を構成する多孔質岩石の Vp/Vs およびポ ワソン比(横軸)と砂岩の石英含有量(縦軸) との関係

(Han *et al.*, 2011a,b に掲載のデータをプロットしたもの)。



図2 貯留層を構成する多孔質岩石の封圧 60 MPa (孔 隙圧 5 MPa) での Vp/Vs (横軸) と常圧での孔 隙率 (縦軸) との関係

岩石の分類は、A:石英>70%,粘土<5%,B:50%<石 英≤70%,粘土>10%,C:石英≤50%,粘土<10%,D: 石英≤50%,粘土>15% (Han *et al.*, 2011a, bに掲載のデー タをプロットしたもの)。 を反映する。砂岩の多くは有効圧(封圧から孔隙圧を差し 引いた値)が上昇すると*Vb/Vs*は小さくなる。

2.2 貯留層岩石の輸送特性と Vp/Vs

岩石の輸送特性(電気伝導度,浸透率)と*Vp/Vs*の有 効圧変化にも岩石の鉱物含有量や粘土含有量との関係が 見られる。図3は*Vp/Vs*(横軸)と見かけのフォーメー ションファクター(*AFF*(*apparent formation factor*):飽和 岩石と孔隙に含まれる流体との抵抗比)の逆数(1/*AFF*: 縦軸)である。4 グループの特徴を以下に述べる。

- (A) 粘土含有量が小さくほぼ石英粒だけから構成された 砂岩は有効封圧の変化に対して Vp/Vs と電気伝導 度がほとんど変化しない(A*:左上)。有効圧上昇 に対して粒子接触や固着の状況が変化せず孔隙ネッ トワークの状態が有効圧上昇の影響を受けていない。淘汰された粒子が強く固着していることを示唆 する。
- (B) 石英含有量が50~70%で粘土を多く含む場合は粒子間の粘土が接触を妨げ Vp/Vsの値を大きくするが、有効圧の上昇で岩石が圧縮されると石英粒子が接触し Vp/Vsは小さくなる。粒子間に存在する粘土のため低い有効圧の状態から孔隙が閉塞されているため1/AFFの変化は小さいものが多い。
- (C) 長石や炭酸塩の含有量が増すと有効封圧の上昇とともに Vp/Vs は変化するが電気伝導度の変化は小さい(右上)。これらは粒径の淘汰は良好だが、固結の度合いが低いためであろう。有効封圧上昇とともに1/AFF が低下するものがあり、孔隙率が小さいことから粒径の淘汰が十分でないと考えられる。



図3 貯留層を構成する多孔質岩石を石英含有量と粘 土含有量で分類した岩石

(A:石英>70%,粘土<5%,B:50%<石英≤70%, 粘土>10%,C:石英≤50%,粘土<10%,D:石英≤ 50%,粘土>15%)のVp/Vs(横軸)と見かけのフォー メーションファクターの逆数(1/AFF:縦軸)の関係。 AFF は飽和岩石の比抵抗と孔隙水の比抵抗の比。封圧 は 60,40,26,20,15,8 MPa で孔隙圧は 5 MPa (Han *et al.*,2011a,bに掲載のデータをプロットしたもの)。

修

(D) 石英含有量が 50%以下で粘土を多く含む砂岩は有 効圧の上昇で粒子接触が増しても Vp/Vs が大きく 変化しない。多くは 1/AFF は低く粘土が孔隙を閉 塞している。

以上のように Vp/Vs は多孔質岩石の粒子間接触の強さ と粒子淘汰の度合いが影響すると考えられる。また、石英 含有量を基準とした鉱物組成は主に Vp/Vs 値に反映され る。粘土含有量は孔隙ネットワークの閉塞をもたらすため 電気伝導度の大小を支配する。粘土含有量が小さければ石 英含有量と粒径淘汰の度合いが電気伝導度の有効圧変化に 影響を与える。

3. 不混和二相流体の流動に関する研究動向

石油・天然ガス資源の探査・生産と CO₂ 地中貯留では, 岩石中の不混和二相流体の移動メカニズムの解明が重要で ある。多くの鉱物は親水性を示し,水は鉱物に対する濡れ 性が高い。鉱物に対して濡れ性の高いものを wetting 流体 (w-流体)と呼ぶ。ここでは水に比べ鉱物に対する濡れ性 の低い流体を non-wetting 流体 (nw-流体)と呼ぶ。地球内 部には水が普遍的に存在するので地質学的に重要な不混和 二相流体は, nw-流体である油や気体,あるいは気体と似 た性質を示す超臨界状態の流体と,w-流体である水や塩水 とが混合したものである。地下深部の CO₂ は超臨界状態 の温度・圧力条件を満たすため, CO₂ 地中貯留の研究では 塩水と超臨界 CO₂ との不混和二相流体が重要な研究対象 である。以下では主に塩水と超臨界 CO₂の不混和二相流体の系を扱う。

3.1 多孔質岩石内での置換型流体移動

これまで、岩石内部を移動する不混和二相流体の議論 では浸透率が重要と考えられてきた。しかし、孔隙ネッ トワーク中の不混和二相流体の移動に関しては nw-流体 とw-流体の粘性係数比と、nw-流体に対するキャピラリー 数と呼ばれる値が重要な役割を持つ。図4の右図に示す ように w-流体に飽和された岩石の孔隙に nw-流体が浸入 するとき、条件によって置換の状況は異なり、粘性係数 比とキャピラリー数で決められる領域ごとに異なる流路 パターンが形成される(Lenormand *et al.*, 1988)。nw-流 体が w-流体の領域を一定の飽和度で等しく置換する領域 は stable displacement と呼ばれる。それ以外では viscous fingering, capillary fingering と呼ばれる流路を形成する(図 4 左図)。領域と流路の形状は徐々に遷移するので、各流 路パターンの領域には明瞭な境界は存在しない。

キャピラリー数(Ca) とは nw-流体が流路内で w-流体 と入れ替わるときの粘性抵抗($\eta_{nw}v_{nw}$: η_{nw} は nw-流体の 粘性, v_{nw} は nw-流体の平均速度)とキャピラリー圧に関 与する w-流体と nw-流体の界面での表面張力(γ_{w-nw})と の比率である。

$$Ca = \eta_{\rm nw} \, v_{\rm nw} / \gamma_{\rm w-nw} \tag{3-1}$$

粘性抵抗は流体の移動方向と直行する方向での流体の速



図4 不混和二相流体の流路パターン(左)とdrainage diagram(右)

CO₂や oil など nw-流体が水に飽和された岩石に浸入する(drainage)の際には nw- 流体と水との粘性係数の比とキャピラリー 数(左パネル上部に示す)との関係で異なる流路パターンを形成する。キャピラリー数の分子はダルシー流の粘性抵抗に相当し, 分母は流体界面の表面張力である。表面張力は孔隙ネットワーク流路のキャピラリー圧による抵抗を支配する。流速が大きいと 流体の流路形成は粘性抵抗に支配され viscous fingering と呼ばれる流路パターンを形成し、流速が小さいと流体はキャピラリー 圧による移動が支配的となり, capillary fingering と呼ばれる流路パターンを形成する(Lenormand *et al.*, 1988 より)。

87

度勾配と粘性係数との積で表される。流路を管で近似した 場合速度が同じなら管径が小さいほど速度勾配が大きい ので粘性抵抗には管径で除した値が含まれ,結果的に速 度勾配は平均速度を管径(*d*)で除した値に比例する。いっ ぽう,キャピラリー圧は表面張力を管径(*d*)で除した値 (γ_{wnw}/d) に比例する。式(3-1) は分子分母に含まれる除 数の管径が相殺した結果である。しかし,それぞれの抵 抗力は実態として分子と分母に管径が含まれるため幅が 広い流路ほど流動抵抗が小さい。nw-流体がw-流体を置換 する際はどちらの fingering パターンも幅の広い流路が優 先される。その結果,水に飽和された多孔質岩石に CO₂ が浸入し水を置換しながら移動する際には幅の広い流路 を起点として,高流速では viscous fingering,低流速では capillary fingering の流路パターンがそれぞれ形成される。

水と超臨界 CO₂ の置換実験はキャピラリー数が-8以上 の viscous fingering 領域でなされたものが多い。地球環境 産業技術研究機構(RITE)では医療用 X線 CT 装置を用 い超臨界 CO₂ の低流速・長時間流動実験を行った(Kogure *et al.*, 2017;2018)。また,超臨界 CO₂ だけが単独で水と 置換するのではなく,CO₂ と水が一定の混合比で岩石内を 移動しながら岩石内の飽和度が定常状態に達したときの流 動形態を調べた。この種の実験ではキャピラリー数の小さ い capillary fingering 領域では実験に長日数を要するため 詳しく調べられていない。従来の実験は砂岩に含まれる微 細層構造に平行な流れで実験が行われていたが,この方向 では浸透率の高い層に選択的に超臨界 CO₂ が流れる。層 構造に直交する方向の流れでは定常時の CO₂ と水の飽和 度は各層で異なる。さらに,岩石全体の飽和度が定常状態 に達しても水と CO₂ の置換は継続し,飽和度の局所的変 動が岩石内で恒常的に起きていることが確認された(図 5)。この現象は不混和二相流体の移動をダルシー流で解析 した Brooks – Corey の式(Brooks and Corey, 1966)では 表現できない。Brooks – Corey のモデルでは不混和二相 流体は水と CO₂ とが個別の流路を形成し,そこをダルシー 則に従い w-流体と nw-流体が移動する。層構造に平行な 流れでは置換を伴わない個別の流路が形成されるが,層 構造に直行する方向では2つの流体は置換をしながら移動 する。

RITE の実験結果では孔隙内での置換が流動方向の数~ 数 10 mm の範囲で起きており、これによって流動方向の 飽和度が±10%以上変動していることが確かめられた。さ らに、流体移動の上流側と下流側の差圧の時間的な変動が 観測され、水と CO₂ の量比が1に近づくほど変動幅が大 きくなる。置換を生じる場所と機会が増えるためである。

近年、シンクロトロン放射光 CT により nw-流体と水と の置換が孔隙サイズの分解能で観測された。それによる と、複数の孔隙にまたがって存在する CO_2 クラスター間 の結合 (coalescence) や、結合部に水が入り込んで一部の CO_2 を孤立クラスターとして閉じ込めるメカニズム (snapoff) の存在が明らかにされた (Armstrong *et al.*, 2016)。ま



図5 左:CO₂と塩水の不混和二相流体を砂岩の層構造に垂直な方向に流したとき、長時間の平均で岩石内飽和度が平 衡に達した状態でも岩石内部の飽和度は変動している。

右: CO₂と塩水の混合比を変化させた場合の注入側と排出側の差圧変動。CO₂と塩水の混合比が等量のときに差 圧の変動が大きくなる(Kogure *et al.*, 2018より)。

修

た,置換の際に Haines jump と呼ばれ,以前からその存在 が指摘されていた圧力の上昇と急激な下降(Haines 1930; Yamabe *et al.*, 2015)が局所的に生じている状況も可視化さ れた(Berg *et al.*, 2013; Tekseth *et al.*, 2023; Tekseth and Breiby, 2024)。

置換を伴う不混和二相流体の流れは ganglion dynamics と呼ばれ、実験的検証が行われる以前から指摘されてい た (Valavanides *et al.*, 1998) が、近年のシンクロトロン放 射光 CT によって数 μ m の分解能で置換状況が確認された (Berg *et al.*, 2016;)。ganglion dynamics では浸透率は置換 メカニズムには直接関与せず、流体の移動速度や粘性係数 の違いが影響する。とくに移動速度が極めて遅い地質的時 間での流体移動は capillary fingering 型の流路形成と、そ こで生じる ganglion dynamics が重要な役割を担う。よっ て、低浸透率の遮蔽層への超臨界 CO₂ の浸潤や泥岩の割 れ目への油成分の移動など、低浸透率層で地質学的時間を 要する流体移動現象では ganglion dynamics による解釈が 必要となるであろう。

4. Biot の多孔質岩石弾性論の概要と第2種P波

4.1 多孔質岩石の体積弾性率

Biot (1956a) の弾性論では実験的に決める2つの体積 弾性率 $K_s \geq K_d$ が使われる。 K_s は unjacketed 条件, K_d は drained 条件での体積弾性率である。unjacketed 条件では 岩石をそのまま流体中に置き,流体の圧力を上昇させた ときの REV (代表体積要素: Representative Elementary Volume) より大きい領域のひずみを計測する。この体積 弾性率が K_s である。鉱物粒子の分布によるミクロなひず みや応力のゆらぎは十分大きい領域では均一化され均質物 質と考える。REV は均質物質への置き換えが成り立つ最 小領域である。実験用試料の体積が REV より大きければ 計測された物性は岩石全体の性質となる。以下,岩石試料 は REV を越える領域とする。

図6に大気圧(~0.1MPa:ゼロとみなす)中の多孔質 岩石(I)が unjacketed 条件で封圧-p^(f)の中に存在する状態 (II)を示す。このとき岩石の外側と内側(孔隙側)から等 しい圧力が加わる。いっぽう、孔隙部分と形状が等しい体 積弾性率 K。の固体に圧力-p^(f)を加えると孔隙内に埋め込 むことができ,孔隙のない岩石を外圧-p⁶の圧縮したの と同等の状態が再現できる。よって外形のひずみは孔隙が ない固体のひずみと等しく、この体積弾性率が K。である。 この値は岩石に含まれる鉱物の弾性定数からも K。を計算 できると考えられるが、実際には鉱物粒界や鉱物中に含ま れる割れ目や隙間,空洞などが存在するためK。は鉱物か らの計算値より小さくなる。これら孔隙ネットワークに属 さない空隙を本稿では孤立孔隙と呼ぶ。実際の K。は孤立 空隙の影響で計算値より小さくなるので unjacketed 条件 での「実験値」として定義される。また、K、は多孔質岩 石中の固体粒子が形成するフレームの変形が関与しない体 積弾性率と解釈できる。

圧媒体に使われる流体の侵入を防ぐため岩石を jacket で



 図6 上段I.:常圧での多孔質岩石。ΩはREV以上の 大きさを持つ。II.: unjacketed 条件でΩ領域は 変形しΩ'となる。このときの体積弾性率はK_s である。
 下段III.: unjacketed 条件を保った状態で領域 を jacket で包み孔隙流体が排出可能にする。

IV.:外圧を-Pに上昇させる。このときの実 効圧力上昇値は $-(P - p^{(0)})$ である。この状態 を drained 条件と呼ぶ。圧力上昇により外形は Ω'' に変化する。このときの体積弾性率が K_d で ある。

包み内部にチューブを差し込む(図6III)。drained 条件 はこの状態で封圧を-Pに上昇させ、孔隙内流体の圧力を $-p^{(i)}$ に維持したまま孔隙の圧縮による流体を岩石内部か ら排出(図6IV)させる。このときの体積弾性率が K_d で、 固体部分が作るフレームの体積弾性率を意味する。

4.2 Biot-Willis 係数とその意味

常圧にある岩石を unjacketed 状態に置くと圧力- $p^{(0)}$ で ひずみ ε_u が発生する (図 6 : I → II)。次に jacket で包み drained 条件で封圧を-Pにするとひずみ ε_d が加わる (図 6 : III → IV)。それぞれのひずみは Ks と Kd から以下で表 される。

$$\varepsilon_{\rm u} = -(1/K_{\rm s})p^{\rm (f)},\tag{4-1}$$

$$\varepsilon_{\rm d} = -(1/K_{\rm d})(P - p^{\rm (f)})$$
(4-2)

- (*P*-*p*^(f)) は unjacketed 条件から drained 条件に至る圧力 増加の実質的値である。

両者を加えると

$$\varepsilon_{u} + \varepsilon_{d} = -(1/K_{s})p^{(f)} - (1/K_{d})(P - p^{(f)})$$

= -(1/K_{d})[P - (1 - K_{d}/K_{s})p^{(f)}]
= -(1/K)(P - hp^{(f)}) (4-3)

となる。 $b = 1 - K_d/K_s$ をBiot-Willis 係数と呼ぶ。

式(4-3)は固体フレームの体積弾性率 K_d とフレームに 加わる圧力-($P-bp^{(0)}$)によって岩石外形のひずみが得ら れたことを示す。よって -($P-bp^{(0)}$)はフレームに加わる 圧力を示す。このときbは有効圧-($P-p^{(0)}$)に対してフ レームに加わる外圧を示すため- $p^{(0)}$ に対する補正係数で ある。b < 1であるからフレームに加わる外圧は有効圧よ り大きい。有効圧を越える圧力はフレームが内部応力とし て保持している。

unjacketed 条件での外形ひずみは

$$\varepsilon_{\rm u} = -[(1-\phi)/K_{\rm s} + \phi/K_{\rm s}]p^{\rm (f)} = -(1/K_{\rm s})p^{\rm (f)}$$
(4-4)

となる。drained 条件の場合は孔隙率が ϕ からbに変化したと考える外形ひずみは孔隙体積に相当する部分に体積弾性率 K_d の仮想的固体にひずみ $-(b/K_d)(P-p^{(t)})$ を与えれば孔隙内に仮想的固体をはめ込むことができる。(44)と同じ形に書くと

$$\varepsilon_{\rm d} = -[(1-b)/K_{\rm d} + b/K_{\rm d}](P-p^{\rm (f)}) = -(1/K_{\rm d})(P-p^{\rm (f)})$$
(4-5)

となる。ただし、実際には孔隙から取り出された物質の体 積弾性率は K_s で、これが本来孔隙内にはめ込まれる物質 である。孔隙と置き換わる物質は孔隙 $E-p^{(0)}$ と等しい圧 力下になければならず、孔隙から切り取られた物質のひず みは孔隙全体で $-(b/K_s)p^{(0)}$ である。drained 条件では孔隙 流体は排出されるので孔隙体積は孔隙率 ϕ のときより小さ いが、孔隙から切り取られた物質は unjacketed 条件のと きより大きなひずみを与えないと drained 条件での孔隙に 埋め込むことはできない。よって $\phi < b$ となり孔隙体積は 減少するが孔隙率は増加する。

以上から, bは、① drained 条件の有効封圧 $-(P-p^{(0)})$ でフレームに加わる外圧成分を示すため孔隙圧 $-p^{(0)}$ にかかる補正係数、② drained 条件での孔隙率、という2つの解釈が成り立つ。

4.3 そのほかのパラメータと undrained 条件での Gassmann-Biotの式

その他のパラメータには Biot modulus M がある。

$$1/M = (b - \phi)/K_{\rm s} + \phi/K_{\rm f}$$
 (4-6)

式(46)は孔隙壁と孔隙内流体の圧縮率の和が孔隙内に ある実効圧縮率であることを示す。第1項($b-\phi$)/ K_s は孔隙率が増加した分の固体部分のひずみが $-(b-\phi)$ ($1/K_s$) $p^{(0)}$ となることに対応する。このひずみが孔隙壁に 対し内側からの孔隙圧で生じたひずみである。第2項は孔 隙圧 $-p^{(0)}$ で生じた流体のひずみである。これら2つのひ ずみを加えたものが REV 内部の孔隙ひずみとなる。

詳細は省略するが,以上から Gassmann-Biot の式と呼ば れる undrained 条件(孔隙内流体が REV 内に閉じ込めら れた状態)での体積弾性率が

$$K_{\rm u} = K_{\rm d} + b^2 M \tag{4-7}$$

が得られる (Biot, 1956a; Carcione, 2007; 西澤 2023a)。 ただし, (4-7) 式については以前から疑義が提出されてお り, Thomsen (2022) が疑義について論じている。

4.4 多孔質岩石内を伝播する第2種P波

等方性多孔質岩石内を伝播する弾性波は第1種,第2種 と名付けられた2種類のP波とS波である(Biot 1956b)。 第1種のP波は主として固体部分を伝播するP波から成り, 流体は固体変位に追随して変位する。固体と流体の変位に はわずかな位相差が存在するが,これは流体の粘性に基づ くエネルギーの散逸の原因となる。第2種のP波は孔隙 内流体を伝播する圧力波(音波)である(Biot, 1956b;西 澤 2023b)。孔隙内流体の体積弾性率が小さいことおよび, 流体の密度が多くの場合固体より小さいため第2種P波 のエネルギーは第1種のP波より小さい。また,周波数



図7 第2種のP波は孔隙内の流体を伝播する波であ るから流体に浸した岩石に水中音波を放射する と岩石内で励起されやすい。水中音波を固体表 面に射出すると第1種P波,S波,第2種P波 が励起される。これら3種類の波は速度が異な るため屈折角が異なり,岩石中でそれぞれが異 なる経路を進むので岩石はプリズムのように弾 性波を分離する。入射角が大きくなれば速度の 大きい第1種P波はいち早く臨界角を越えるた め記録から波形が消え振幅の小さい第2種P波 が記録に現れる(Kelder and Smeulders, 1997)。

石油技術協会誌 90 巻 2 号 (2025)

修

が低い場合は孔隙内の圧力勾配による流体の拡散現象を伴 うため、エネルギー減衰が大きい。いっぽう高周波では伝 播時のエネルギー減衰が小さく、実験で観測可能である。

第1種のP波の速度は undrained 条件での体積弾性率 K_uを用いて低周波側で

 $V_{\rm P1} = \left[\left(K_{\rm p1} + 4\mu_{\rm m}/3 \right) / \rho \right]^{1/2} \tag{4-8}$

となる。 ρ は岩石全体の密度で固体部分と流体部分の密度 $\rho_{s} \geq \rho_{t}$ の比率の和

$$\rho = (1 - \phi)\rho_{\rm s} + \phi\rho_{\rm f} \tag{4-9}$$

である。

第1種のP波はわずかな分散を伴うがほぼ一定速度と みなしてよい。いっぽう,第2種のP波は低周波側では 流体の拡散を伴うが波動として残るか否かは拡散係数に依 存する。振動する圧力変動源からの拡散では振幅は1/4波 長でほぼゼロとなる。周波数が高くなると流体が拡散で広 がるより先に圧力変動源からの圧力波成分が卓越し,第2 種P波が孔隙流体内を伝播する。周波数が増すと第2種P 波の速度も速くなるがS波速度を超えることはない。

第2種P波を実験で観測するには流体中を伝播する圧 力波であることを利用する。図7は水中音波を利用して砂 岩の中を伝播する第2種P波を観測した例である。直方 体の砂岩の面への入射角を変化させれば、第1種P波、 S波、第2種P波の順に速度が小さくなるため、屈折角の 違いにより3種類の波の経路を分離できる。第2種P波 は流体中の音響波であるから、水中音波に対する音響イン ピーダンスの違いが小さく固体内の流体に効率よく伝播す る。直方体岩石を回転させると光学プリズムと同様に3種 類の波が分離され振幅の小さい第2種P波を取り出すこ とができる。

参考文献

- Armstrong, R. T., McClure, J. E., Berrill, M. A., Rücker, M., Schlüter, S. and Berg, S., 2016: Beyond Darcy's law: The role of phase topology and ganglion dynamics for two-fluid flow Phys. Rev. E 94, 043113. https://doi.org/10.1103/ PhysRevE.94.043113.
- Berg, S., Otta, H., Klappa, D. A., Schwinga, A., Neitelera, R., Brusseea, N., Makurata, A., Leua, L., Enzmannb, F., Schwarzb, J-O., Kerstenb, M., Irvinec,d, S., and Stampanonic, M., 2013: 3D imaging of Haines jumps in porous media flow. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 3755–3759. https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1221373110.
- Berg, S., Rücker, M., Ott, H., Georgiadis, A., van der Linde, H., Enzmann, F., Kersten, M. Armstrong, R.T., de With, S., Becker, J., Wiegmann, A. 2016: Connected pathway relative permeability from pore-scale imaging of imbibition. *Advances Water Resources*, 90, 24–35, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0309170816300112.

- Biot, M. A., 1956a: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-SaturatedPorous Solid. I. Low-Frequency Range, J. Acoust. Soc. Am., 28, 168–178. https://doi. org/10.1121/1.1908239.
- Biot, M. A., 1956b: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-SaturatedPorous Solid. II. Higher Frequency Range, J. Acoust. Soc. Am., 28, 179–191. https://doi. org/10.1121/1.1908241.
- Brooks, R. H. and Corey , A. T., 1966: Properties of Porous Media AFFecting Fluid Flow. J. Irrigation Drainage Division, 92 issue 2, https://doi.org/10.1061/ JRCEA4.0000425.
- Carcione, J., 2007: Wave Fields in Real Media, Handbook of Geophysical Exploration. 38, 2nd Ed. Elsevier, ISBN: 9780080468907.
- Haines W. B., 1930: Studies in the physical properties of soil. V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith. *J. Agricultural Sci.*, 20, 97–116. https://doi.org/10.1017/ S002185960008864X.
- Han., T., Best A. I., Sothcott, J., and MacGregor, L, M., 2011a
 Pressure effects on the joint elastic-electrical properties of reservoir sandstones. *Geophysical Prospecting*, 2011a, 59, 506–517., https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2010.00939.
 x.
- Han., T., Best A. I., Sothcott, J., and MacGregor, L, M., 2011b: Joint elastic-electrical properties of reservoir sandstones and their relationships with petrophysical parameters. 59, 518–535. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2010.00940.
 x.
- Kelder, O., and Smeulders, D.M.J., 1997: Observation of the Biot slow wave in water saturated Nivelstiner sandstone. *GEOPHYSICS*, 62, 1794–1796. https://doi. org/10.1190/1.1444279.
- Kogure, T., Zhang, Y., Nishizawa, O., Xue, Z., 2017: Migration mode of brine and supercritical CO₂ during steady-state relative permeability measurements at very slow fluid flow velocity. *Geophys. J. Int.*, 211, 1237–1253, https://doi. org/10.1093/gji/ggx335.
- Kogure, T., Zhang, Y., Nishizawa, O., Xue, Z., 2018: Changes in migration mode of brine and supercritical CO₂ in imbibition process under steady flow state of very slow fluid velocities. *Geophys. J. Int.*, 214, 1413–1425. https://doi.org/10.1093/ gji/ggy210.
- 河村雄行, 1996:岩波地球科学講座5地球惑星物質科学, 鳥海光弘,河村雄行,大野一郎,赤荻正樹,川嵜智佑編, 1–39,岩波書店. ISBN: 4000107259.
- Lenormand, R., Touboul, E. and Zarcone, C., 1988: Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. J. Fluid Mech., 189, 165–187, doi:10.1017/ S0022112088000953.

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

- 西澤 修, 2023a: Biot modulus M について. 物理探査, **76**, 42–57. https://doi.org/10.3124/segj.76.42.
- 西澤 修, 2023b: Biot の第2種P波について. 物理探査, **76**, 58–74, https://doi.org/10.3124/segj.76.58.
- Tekseth, K. R., and Breiby, D. W., 2024: 4D imaging of twophase flow in porous media using laboratory-based microcomputed tomography. *Water Resources Research*, 60, e2023WR036514. https://doi.org/10.1029/2023WR036514.
- Tekseth, K. R., Mirzaei, K. R., Lukic, F., Chattopadhyay, B., Breiby, D. W., 2023: Multiscale drainage dynamics with Haines jumps monitored by stroboscopic 4D X-ray microscopy. *Proc.Natl Acad. Sci.* **121** (1), e2305890120, https://doi.org/10.1073/pnas.2305890120.
- Thomsen, L., 2022: A logical error in Gassmann poroelasticity. *Geophysical Prospecting*, **71**, 649–663. https://doi. org/10.1111/1365-2478.13290.
- Valavanides, M.S., Constantinides, G.N. and Payatakes, A.C., 1998: Mechanistic model of steady-state two-phase flow in porous media based on ganglion dynamics, Transp. *Porous Media*, **30**, 267–299, doi:10.1023/A:1006558121674.
- Yamabe, H., Tsuji, T, Liang, Y. and Matsuoka, T., 2015: Lattice Boltzmann Simulations of Supercritical CO₂-Water Drainage Displacement in Porous Media: CO₂ Saturation and Displacement Mechanism. *Environmental Science & Technology*, 49, 537–543, https://pubs.acs.org/ doi/10.1021/es504510y.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月) 93 ~ 100 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 93~100



岩石物性の変化に基づく多孔質岩石中の二相流体挙動の推定*

北村 圭吾**.*・本田 博之**・三谷 泰浩**

(Received January 23, 2025; accepted March 11, 2025)

Estimation of two-phase fluid behavior in porous rocks based on rock properties

Keigo Kitamura1, Hiroyuki Honda and Yasuhiro Mitani

Abstract: This study investigates the potential of monitoring CO_2 behavior using seismic wave velocities. Specifically, the relationship between CO_2 saturation (S_{CO_2}) in porous rocks and seismic wave velocities $(V_p \text{ and } V_s)$ was examined through core flooding experiments involving supercritical CO_2 . Measurements of seismic wave velocities, electrical resistivity (ρ_e) , and strain (ε) were conducted simultaneously, and the results were analyzed using the Gassmann-CRM model. The key findings are as follows:

1. Sensitivity of V_p

 V_p is highly sensitive to CO₂ saturation and distribution patterns. However, its sensitivity is significantly influenced by injection rates and the macroscopic capillary number (N_c).

- Behavior at low N_c values When N_c is below 1 (N_c ≤ 1), changes in V_p are limited. Conversely, N_c and seismic wave amplitude are more sensitive to CO₂ behavior under these conditions.
- Effects of CO₂ injection rates Higher CO₂ injection rates result in significant changes in cluster size and more pronounced V_p responses associated with S_{CO2}.

These results highlight the importance of integrating complementary methods, such as ρ_e and seismic wave amplitude, in addition to V_p , for effective monitoring of CO₂ reservoirs. For high-permeability reservoirs, using N_c as a key metric for monitoring strategies is particularly effective.

Keywords : CO_2 saturation (S_{CO_2}) ; Seismic wave velocities $(V_p \text{ and } V_s)$; Macroscopic capillary number (N_c) ; Gassmann-CRM model ; Multi-parameter monitoring

1. はじめに

本講演では、二酸化炭素地中貯留(以下 CCS)の基礎 研究として行った、含水多孔質砂岩への超臨界 CO₂ 浸透 試験と岩石物性測定結果を基に、多孔質砂岩中の二酸化炭 素(CO₂)-水の二相流体挙動、特に(1)岩石中の CO₂ 飽和 度と弾性波速度の関係、(2)岩石物性による CO₂-水系二 相流体挙動の把握について検討した。

深部塩水帯水層や枯渇油ガス田に圧入された CO₂ は圧

入圧力や浮力を駆動力として貯留層内部の地層水や残留流 体を置換しながら移動する。この時、貯留層内部の流体は 水単相もしくは水-油,水-天然ガスの2相から,水-CO。 の2相や水-油-CO2などの3相に変化し、流体の密度や 体積弾性率(K)が大きく変化することが想定される。また, CO2 圧入にともなう間隙水圧の変化は貯留層を構成する岩 石の岩石骨格に影響を与え、岩石の体積弾性率や剛性率が 変化すると考えられる。さらに圧入された CO₂の一部は 周囲の流体に溶解し炭酸(H₂CO₃)となり、さらに炭酸水 素イオン (HCO₃) と水素イオン (H⁺) に電離する。さ らに電離が進む炭酸水素イオンは炭酸イオン(CO₃²⁻)と水 素イオンを生成する。このような変化によって地層水のイ オン総量が CO2の状態の変化することが予想される。こ うして地層水に溶解してイオン化した CO2 は地層水中の カルシウムイオン (Ca²⁺)やマグネシウムイオン (Mg²⁺) と反応し鉱物化することで流動性を失い安全に地中に固定

^{*} 令和6年6月4日令和6年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部 門シンポジウム「岩石物理学-E&P事業における成果と脱炭素社会 へ向けた新展開-」にて This paper was presented at the 2024 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –" held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

^{**} 九州大学大学院工学研究院 Fuculty of Engineering, Kyushu University * Corresponding author: E-Mail: kitamura.keigo.559@m.kyushu-u.ac.jp

される。

本講演では地下深部に圧入された CO_2 の状態変化, 特に CO_2 -地層水の二層流体の挙動を外部からの観測可 能な4種の物理量,P波速度(V_p : Compressional wave velocity),S波速度(V_s :Shear wave velocity),電気比抵抗(ρ_e : Electrical resistivity),岩石歪み(ε :Strain)を用いて評価す ることを目的として実施した実験の結果を基に検討する。

2. 流体に飽和した岩石の弾性波速度

弾性波速度や比抵抗など外部から観測可能な物性値から 地下深部の CO₂ 貯留層の CO₂ 飽和率(S_{CO2})を評価するこ とは CCS の貯留量評価や安全性評価を行う上で重要であ る。貯留層内の原油・天然ガスの賦存量を評価するために は弾性波探査が一般的に用いられる。ここでは流体に飽和 した岩石の弾性波速度モデルについて簡単にまとめる。

岩石の弾性波速度(*V_p*, *V_s*)は一般にそれぞれ次の式で 示される(例えば Mavko *et al.*, 2009)。

$$V_{p} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \tag{1}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2}$$

この時, Kは岩石の体積弾性率, μ は剛性率, ρ は密度である。

非濡れ性流体 (Non-wetting fluid) と地層水の2相の流体を含む岩石の場合,岩石密度 ρ_t は以下のように示すことができる。

$$\rho_{t} = (1 - \phi) \rho_{sk} + \phi \{ (1 - S_{w}) \rho_{nw} + S_{w} \rho_{w} \}$$
(3)

この時、 ρ_t 、 ρ_{st} 、 ρ_{nw} 、 ρ_w はそれぞれ岩石、岩石骨格、 非濡れ性流体、地層水の密度である。また ϕ は間隙率、 S_w は間隙の水飽和度である。

上記の式1および2より体積弾性率(K)および剛性率 (μ),岩石の密度(ρ_t)によって弾性波速度が決定される ことが分かる。

剛性率μは V_p と V_s に共通しているのに対し,体積弾性 率 K は V_p のみに現れる。剛性率は岩石の剪断応力に対す る変形のしにくさを示し,岩石骨格を構成する鉱物によっ て支配されており,間隙流体の影響を直接的には受けない。 一方,体積弾性率は等方圧縮に対する岩石の体積変化のし にくさを示す物性値で,岩石骨格と間隙の流体の影響を受 ける。

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - K_{dry}/K_{sk})^2}{\phi/K_{fl} + (1 - \phi)/K_{sk} - K_{dry}/K_{sk}^2}$$
(4)

この時, K_{sat} は飽和岩石の体積弾性率, K_{dry} は乾燥岩石の 体積弾性率, K_{st} は岩石骨格の体積弾性率, K_f は間隙流体 の体積弾性率である。

式4はGassmanns式(Gassmann, 1951)と呼ばれ、飽

和岩石の体積弾性率が間隙中の流体の影響を強くうけていることを示す。Mavko *et al.* (2009) では間隙中の水と非濡れ性流体の分布パターンの違いが、 K_{f} の値の大きな違いをつくり、 V_{ρ} が大きく変化することを理論的に示した。 K_{f} を間隙流体を構成する流体の各相の体積弾性率の調和平均 (Reuss 平均: K_{Reus}) とする Gassmann-Wood モデル (式5) は K_{sat} の下限値となる。

$$\frac{1}{K_{Reuss}} = \sum_{i} \frac{S_{i}}{K_{i}}$$
(5)

一方, K_nを各流体相の相乗平均(Voigt 平均;式6)は理 論上のK_{ent}の上限値となる。

$$K_{Voigt} = \sum_{i} S_i K_i \tag{6}$$

このとき *S_i*は間隙流体をする相*i*の飽和度, *K_i*は体積弾 性率である。

また、相加平均と調和平均の相加平均である Hill 平均(も しくは Voigt-Reuss-Hill 平均;式8) は Voigt 平均と Reuss 平均の中間的なより現実的な K_{sat} となるモデルなどが提案 されている。

$$K_{Hill} = \frac{K_{Voigt} + K_{Reuss}}{2} \tag{7}$$

Mavko and Mukerji (1998) では、より取り扱いやすい P 波弾性率 (*H*:式 8) を導入することで、岩石の間隙中で の非濡れ性流体の分布パターンの議論を可能とした。

$$H = \rho_t V_p^2 = K_{sat} + \frac{4}{3} \mu$$
 (8)

Mavko and Mukerji (1998) は体積弾性率Kで記載されて いた, Gassmann-Wood モデル(式7) と Gassmann-Hill モ デル(式8)をHを用いて新たに定義した。

$$H^{GW} = H_{d} + b^{2}M \tag{9}$$

式9にP波弾性率を用いた Gassmann-Wood モデルを示 す。この時 H_d は乾燥状態のP波弾性率, bはBiot-Willis 係数, Mは流体貯蔵弾性率(Fluid storage modulus) であり, そ れぞれ以下の式で表される。

$$b = 1 - \frac{K_{dry}}{K_s}$$
(10)

$$M = \left[\frac{(b-\phi)}{K_s} + \frac{\phi}{K_{fl}}\right]^{-1}$$
(11)

このとき K_{f} は流体を構成する要素の体積弾性率のReuss 平均(有効流体弾性率)を用いている。Gassmann-Wood モデルでは間隙中の非濡れ性流体のクラスタサイズが十分 に小さく、弾性波速度によるモニタリングでは均一に分布 しているように見える状態(Uniform saturation)をしめす。 次に Gassmann-Hill モデルを式 12 に示す。

$$H^{CH} = 1 / \left[\frac{S_{nw}}{H_{sat}^{nw}} + \frac{S_w}{H_{sat}^w} \right]$$
(12)

この時, H_{sat}^{nv} は非濡れ性流体に完全に飽和した時の P 波弾 性率, H_{sat}^{v} は水に完全に飽和したときの P 波弾性率である。 Gassmann-Hill モデルは間隙中の非濡れ性流体が弾性波速 度によって判定可能なクラスタサイズを有し,不均質な分 布 (Patchy saturation)を示すことが可能なモデルである。 ただし, Patchy saturation モデルは非濡れ性流体の拡散距 離 λ_a が弾性波の波長より大きいときにのみ,適応可能で ある点を考慮しておく必要がある。

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\kappa N}{\omega \eta}} \tag{13}$$

この時, κ は浸透率, ω は角周波数, η は流体の粘性率である。また, Nは次式で示される。

$$N = M \frac{H_d}{H_{sat}} \tag{14}$$

*H_{sat}*は Gassmann-wood モデルで評価した P 波弾性率である。最後に弾性波による検知可能なクラスタサイズ(臨界 パッチサイズ)を式 15 に示す。

$$L_c \approx \sqrt{\frac{\kappa K_{f}}{f\eta}}$$
(15)

現在では二相流体の分布スケールを考慮した P 波速度と 飽和率の関係として Patchy saturation モデルを拡張したさ まざまなモデルが提唱されている。例えば不均質な分布を 示す非濡れ性流体のクラスタ (Patch)のサイズを考慮し た Gassmann-CRM モデル (*HCRM*) などが広く利用されて いる (Caspari *et al.*, 2011; Gurevich and Lopatnikov, 1995; Muller *et al.*, 2010; Muller and Gurevich, 2004)。

本稿では以下に示す Gassmann-CRM モデルに基づいて 議論を進める(式 16)。

$$H^{CRM} = H^{GW} \left[1 + \frac{H^{GH} - H^{GW}}{H_{h} - H_{l}} \frac{H_{eff} - H_{l}}{H^{GW}} \right]$$
(16)

この時, H_{eff}は有効複素 P 波弾性率, H_hは P 波弾性率の 高周波限界, H_iは低周波限界である。

$$H_{eff} = \left[1 - \Delta_2 - \frac{\Delta_1 k^2 a^2}{(ika - 1)^2}\right]^2 \tag{17}$$

 $H_{h} = H_{0}(1 - \Delta_{2} + \Delta_{1})^{2}$ (18)

$$H_{1} = H_{0} (\Delta_{2} - 1)^{2}$$
⁽¹⁹⁾

 H_0 は式 11 により計算される流体貯蔵弾性率の平均値 $\langle M \rangle$ を用いて計算した P 波弾性率である。

$$H_0 = K_{dry} + b^2 \langle M \rangle + \frac{4\mu}{3}$$

$$\tag{20}$$

は式11を用いて算出する。

$$k = \sqrt{\frac{i\omega\eta}{\kappa N}} \tag{21}$$

$$\Delta_1 = \frac{H_d \Delta_2}{H_{ext}} \tag{22}$$

$$\Delta_2 = \frac{b^2 \langle M \rangle \sigma_{MM}^2}{2H_{syt}}$$
(23)

この時、 σ_{MM}^2 は平均流体貯蔵弾性率の正規化分散を示している。

ここまで述べてきたように V_oは岩石の間隙中の非濡れ 性流体の分布・性状を反映するため、資源探査や CCS に おける CO₂ 貯留層モニタリングなどさまざまな分野で広 く利用される。

V_p および *V_s*の同時測定に基づく CO₂ 飽和度推定

弾性波速度による資源探査や CO₂ 貯留層のモニタリン グにおいて,非濡れ性流体の飽和度(*S_{nu}*)を弾性波から 把握することが第一の目的であろう。前章で述べたよう に,流体に飽和した岩石の弾性波速度(*V_p*および*V_s*)は 不濡れ性流体の分布パターンや*S_{nu}*に強く影響を受けてい ることが明らかになっている。そこで本章では弾性波速度 と*S_{nu}*の関係について,水に飽和した岩石へ超臨界 CO₂ を 注入するコアフラッド試験に弾性波速度測定を組み合わせ て行った試験結果(Kitamura *et al.*, 2014)から検討する

水に飽和した多孔質砂岩に CO_2 を注入し S_{CO_2} の変化に 対する弾性波速度の変化を検討する研究は CCS の基礎研 究として広く行われている (Lei and Xue, 2009 : Xue and Ohsumi, 2004 : Xue and Lei, 2006)。これらの先行研究は超 臨界 CO_2 の注入に伴い V_p が最大 10%程度減少すること, 岩石中の CO_2 の分布が岩石の間隙構造に規定されて不均 質な分布を示していることなどを示している。

含水の多孔質砂岩に超臨界 CO₂ を注入したときに, CO₂ が不均質な分布を示すことは X 線 CT スキャン装置を用い たコアフラッド試験でも明らかにされている(Ahmed and Lebedev, 2018; Shi *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014)。

また、Gassmann 式とその拡張モデルから、非濡れ性流体(この場合、CO₂)の分布パターンが $S_{nw} \ge V_p$ の関係に大きな影響を与えることが明らかになっている(例えばGassmann-Wood モデルやGassmann-Hill モデル)。これは V_p から S_{nw} を正確に推定するためには非濡れ性流体の分布パターンを把握する必要があることを示している。しかし、地下深部の非濡れ性流体の分布を正確に把握することは現実には非常に困難である。

そこで Kitamura *et al.* (2014) では流体分布に影響をう ける K_{f} とは独立な関係である $V_s \approx V_p$ と同時に測定し, V_s から S_{CO_2} を評価し V_p - S_{CO_2} の関係について検討してい る。この実験では間隙率(ϕ) が 24%,水の絶対浸透率が 10 mD の多胡砂岩を用いている。この研究では CO_2 注入

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)



図1 CO₂注入および再注水過程における、V_pとVsの変化(Kitamura et al., 2014)

(Drainage)の終了に引き続いて水を再注水(Imbibition) を行いながら弾性波速度を測定している。Drainge は約 30000 s で 2.13 PV(約 100 × 10⁻⁶m³)の超臨界 CO₂ を注 入した。また, Imbibiton では約 42000 s で 2.34 PV(約 110 × 10⁻⁶m³)の CO₂ 飽和水の注入を行った。それぞれ の流体の注入速度は Drainage・Imbibition ともに一定流量 (8.33 × 10⁻⁹m³/s)である。

図1に V_p と V_s の測定結果を示す。Drainage 過程では CO₂注入量の増加に伴い、 V_p は急激に減少を示す一方で V_s は緩やかな増加を示した。また、Imbibition 過程におい ては V_p は緩やかな増加、 V_s は減少を示した。

次に V_s から S_{co_2} の推定を行った。 V_s は式2で示され ているように剛性率 μ と全岩の密度 ρ_t から推定が可能で ある。剛性率 μ については Hertz-Mindlin model (例えば Mavko *et al.*, 2009) によって推定した。乾燥状態の岩石の 密度,間隙率ゆをそれぞれ測定し,乾燥密度は岩石骨格の 密度 (ρ_{st}) とした。剛性率 μ は間隙中の流体の影響を受 けない。そのため、 V_s の変化は間隙流体の密度の変化を 示していると考えることができる。

$$\rho_t = (1 - \phi) \rho_{sk} + \phi \{ (1 - S_w) \ \rho_{CO_2} + S_w \rho_w \}$$
(24)

式 15 に V_sに部分飽和した岩石の密度をしめす。このとき, 間隙流体を水と CO₂ の二相流体として考える場合 S_{cO2} は 16 式のように S_m の関数として考えることができる。

$$S_{\rm CO2} = 1 - S_w$$
 (25)

このようにして評価した S_{co_2} と Drainage および Imbibition の V_p の関係を図 2 にしめす。図 2 には H^{cw} , H^{CH} および 1D Gassmann-CRM モデルに基づいて推測したそれぞれの V_p - S_{co_2} 曲線を合わせて示している。

その結果、以下の3点が明らかになった。

- Drainage と Imbibition において V_p-S_{co2} に履歴効果 が見られる。
- 2. 残留トラップされた CO2 の存在が示唆された。



図2 V_sの変化から推定したS_{co2}とV_pの関係 (Kitamura *et al.* 2014 に加筆)

3. Dorainage と Imbibition で CO₂ クラスタサイズが変 化している。

これらの測定結果は X 線 CT 装置を用いたコアフラッド 試験と弾性波測定の同時測定を行った研究結果と調和的 である(Kobayashi and Mavko, 2016; Lebedev *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2015)。

4. 高浸透率岩石の V_p および岩石歪の同時測定

次に高浸透率(105 mD)かつ高間隙率(26.4%)の Mt. Simon 砂岩を用いたコアフラッド試験と V_pおよび歪同時 測定の結果を基に CO₂の注入速度が含水岩石の物性にあ たえる影響について Kitamura *et al.*(2018)に基づいて検 討する。

円柱状に整形した実験試料の異なった高さに 3 ch の V_p 測定用の振動子を、試料中心部に歪ゲージを設置した。 水に飽和した岩石試料に一定流量(8.33×10^{-9} m³/s) で注入時間 25800 s で 210 約 25800 s で 7.5 PV(約 214 × 10^{-6} m³)の超臨界 CO₂を注入している。図 3 に V_p および



図3 Mt.Simon 砂岩に CO₂を注入したときの V_pと歪の変化(Kitamura *et al.* (2018)に加筆)



図4 V_p の変化量と S_{CO2} の関係。(Kitamura *et al.* (2018) に加筆)

歪 ε の測定結果を示す。

その結果、 V_p の低下量が最大でも4%程度と先行研究 (Xue and Ohsumi, 2004)から想定される値より小さく、 S_{co_2} もそれほど大きくない可能性が示された。一方、 CO_2 圧入に伴う岩石の ε は明確な膨張傾向を示し、 CO_2 の注入 が実験試料中の間隙構造に影響を与えていること、注入 終了後も膨張状態を維持していることから、一定量の CO_2 が実験試料中に存在していることを示唆している。この結 果は前述の先行研究と調和的である。

これらの2つの物性値の測定結果が示す,実験試料中の 水 – CO_2 流体の挙動について Gsaamann-CRM モデルを用 いて検討する。岩石骨格の体積弾性率(K_{st}) と剛性率(μ) は前述の有効媒質モデルと間隙圧の変化を考慮するために Hertz-Mindlin contact theory(例えば Mavko *et al.*, 2009) を用いて推定した(図4)。

その結果、4%程度の速度低下から想定される S_{co2} はク ラスタサイズによって5~25%程度と幅広い値をとるこ とが分かった。また臨界パッチサイズを式15に基づき評 価した結果、4.2 mm と大きな値を示した。この結果から Mt. Simon 砂岩に CO₂ を一定かつ比較的低い流量で注入し た本実験では大ききな CO₂ クラスタが形成され V_{ρ} の変化 は限定であったことが Gassmann-CRM モデルに基づいた 検討から示唆された。この検討結果は歪 ε の測定結果が示 す岩石の膨張傾向と V_{ρ} の変化を矛盾なく説明できる。ま た、P 波の波形の Power Spectrum Density (PSD) も CO₂ の注入量の増加に伴い減少している(図 5)。

この実験結果と Gassmann モデルに基づく検討結果から は歪や波形の持つエネルギーなどの物性値が S_{co2}の変化 に敏感に反応している場合でも V_pには反映されない場合 があることを示唆している。

5. 流体注入速度が弾性波速度に与える影響

Kitamura *et al.* (2021) では、CO₂ 注入速度が多孔質砂岩 における V_p と電気抵抗率 (ρ_e) に与える影響を評価する



図5 P 波波形 (a) と PSD (b) の CO₂ 圧入に伴う変化(Kitamura et al. (2018)に加筆)

ことを目的として,Berea 砂岩(ϕ :18.1%,絶対浸透率: 15 mD)を用いたコアフラッド試験を実施した。この研究 では V_{ρ} を主たるモニタリング指標とし、 ρ_{e} を相補的な物 理量として用いることで、CO₂の二相流挙動や物理特性の 変化を検討している。

ここでは CO_2 の注入速度の指標としてマクロスケール キャピラリー数 (N_c : Virnovsky *et al.*, 2004) を導入した。 一般的に用いられるキャピラリ数 (C_a) は間隙スケール ($10^{-8} << 10^{-4}$) での粘性力と毛管力の比から算出され,間 隙内での流体の移動や置換を検討する際に用いられる無次 元数である。今回導入した N_c はマクロスケール(岩石ス ケールから地層スケール: $10^{-3} << 10^2$ m) での流体挙動を 評価するために,毛管力と圧力勾配から算出される指標で あり,貯留層内部での流体挙動を評価するために導入した。

$$N_{c} = \frac{\mu_{\rm CO_2} V_{\rm CO_2} H}{\gamma} \frac{\Delta P}{L} = \frac{D}{|\Delta P_{c}(f_{w})|}$$
(26)

この時、 μ_{co_2} は CO₂の粘性率、 V_{co_2} は CO₂のダルシー 速度、 γ は CO₂-水系の表面張力、D は不均質性を表す代 表的な長さのスケールであり、ここではコアの直径(35 mm)を採用している。 ΔP は間隙流体差圧で測定値、L

FR	$\log_{g10}C_a$	N_c	S _{CO2}
$(\times 10^{-10} \mathrm{m^3/s})$	(-)	(-)	(-)
1.67	-8.84	0.70	0.05
8.33	-8.14	1.36	0.10
16.67	-7.84	1.52	0.16
83.33	-7.14	2.76	0.25
166.67	-6.84	6.75	0.35
333.33	-6.54	17.37	0.39
500	-6.37	30.93	0.41
833.33	-6.14	71.60	0.47

表1 CO_2 注入速度と C_a , N_c および S_{CO_2}



図 6 CO₂ 注入速度の変化に伴う $V_p \ge S_{CO_2}$ および N_c の関係。Gassmann-CRM モデルに基づい て評価した V_p -S_{CO2}曲線も併せて示している (Kitamura *et al.*, 2021)

はコア長(70 mm), $|\Delta P_c(f_w)|$ は飽和度に伴う毛管圧の特性差の平均である。この値を実験的に評価することは困難である。そこでここでは Reynolds and Krevor (2015) にならい, Berea 砂岩の入口毛管圧(Entry capillary pressure P_e)を代用している。 N_c は圧力差を導入することで重力の影響を考慮することが可能となる。また,この研究ではマスバランス法を用いて S_{co_2} を独立に求めている。それぞれの注入速度での C_a , N_c および S_{co_2} を表1に示す。

次に S_{co_2} の注入速度を変化させた時の弾性波速度と S_{co_2} の関係を示す。また、 CO_2 の注入速度を変化させた時の ΔP に基づいて計算した N_e , Gassmann-CRM モデルによっ て評価したクラスタサイズの変化に伴う V_p - S_{co_2} も併せて 示す(図6)。この時、臨界パッチサイズは0.44 mmであった。

この結果、 CO_2 の注入速度が大きくなると、 S_{co_2} が大 きくなることが明らかになった。また、 N_c が1以下では S_{co_2} の変化に伴う V_b は小さいが、 N_c が1を超 $\pi\pi$ えると CO_2 クラスタサイズの変化が大きくなり V_b も大きく変化 することが明らかになった。

一方,比抵抗 ρ_e は注入速度の増加に伴う S_{co_2} の変化に対して増加傾向を示した(図7)。この結果は多くの先行研究結果と調和的である(例えば,Nakatsuka *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2017)。また, V_p では S_{co_2} の変化に対する感度が低かった N_c の領域(<1)でも ρ_e は S_{co_2} の変化に高い感度を示している。

また、P 波波形の Peak 周波数と振幅の変化も S_{co_2} の変化に対して $N_c < 1$ の領域で敏感に反応することが明らかになっている(図 8)。

これらの結果から S_{co_2} の変化を V_p や ρ_e などの物性値に よるモニタリングの可能性について、 CO_2 の注入速度の観 点から以下のようにまとめる。

- *N_c*が<1の時, S_{co2}の変化は*V_p*の変化として明確 には見えてこない。
- 2. N_cが>1になると、V_pの変化として観測可能である。
- 比抵抗 (ρ_e) は N_e にかかわらず S_{co2} の変化と良い 相関を見せる。



図7 $\rho_e \geq S_{CO_2}$ および N_c の関係(Kitamura *et al.*, 2021)



図8 N_cの変化に伴うS_{CO2}とP波波形のPeak 周波数 と振幅の変化(Kitamura et al., 2021)

 P 波波形の振幅の変化は N_c が<1の時, S_{co2}の変 化に対して敏感である。

6. まとめ

本講演では CCS おける弾性波,特に P 波速度 (V_{ρ}) を 用いた CO₂ 挙動モニタリングの可能性について,実験的 手法による測定した物性値と Gassmann-CRM モデルに基 づいて検討した。

その結果、 V_{p} は含水多孔質岩石中の CO_{2} などの非濡れ 性流体の挙動を把握する上で極めて有用であることを確 認した。一方で CO_{2} の注入速度によっては $S_{co_{2}}$ の変化に 対する感度が著しく低下する可能性があることも明らか になった。、マクロスケール($10^{-3} << 10^{2}$ m)での流体挙 動を特徴付ける指標であるマクロスケールキャピラリー 数(N_{c})を用いて CO_{2} 注入速度の影響を評価すると、 V_{p} が $S_{co_{2}}$ の変化に対して優位性をしめす領域は $N_{c} > 1$ であ ることが明らかになった。一方、 $N_{c} < 1$ の領域では比抵抗 ρ_{e} や P 波波形、とくに振幅の変化が $S_{co_{2}}$ の変化に対して V_{p} より高い感度を持つ可能性が示唆された。

Jackson and Krevor (2020) は以下の CCS プロジェクト (Sleipner CO₂ Storage Project, Otway CO₂ Storage Project, Frio Pilot Project, Quest Carbon Capture and Storage Project) の CO₂ 貯留層をの観測データと数値シミュレー ションに基づいて CO₂ 挙動を検討し N_e の空間的分布を評 価している。その結果,全ての貯留層において注入井から の距離が 1 ~ 10 m 程度離れた地点で N_e が 1 以下となる可 能性が高いことを明らかにした。このことは CCS におい て貯留層に圧入された CO₂ のモニタリングにおいて,注 入井から数m離れた地点では V_p ではなく ρ_e や弾性波の振 幅が S_{CO2} の変化に対して強い感度を持っていることを示 唆している。

今回の検討によって CCS における CO₂ 挙動モニタリン グには V_pを補完する複数の物性値を用いたマルチモニタ リング手法を用いることが重要であることが明らかになった。補完するモニタリング手法としては一般には比抵抗 ρ_eを用いた電気探査が考えられるが、弾性波の波形とく に振幅変化も有望であることが示唆された。

謝 辞

本講演は、筆頭著者が地球環境産業技術研究機構、九州 大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所、およ び同大学大学院工学研究院において得た研究成果を取りま とめたものである。本成果は、多くの先輩や同僚、ならび に九州大学の学生諸氏の協力なくしては得られなかった。 ここに、心より感謝の意を表する。特に、元カーボンニュー トラル・エネルギー国際研究所の西澤修氏には、日頃より 建設的な議論を交わしていただき、多大な貢献を賜った。 この場を借りて、深く感謝申し上げる。また、匿名の査読 者1名からのコメントは大変有益であり、本講演の内容の 精査に大いに役立った。さらに、本講演の機会を賜った石 油技術協会の関係者の皆様に、厚く御礼申し上げる。特に、 大成建設の真田佳典氏には、多大なご支援をいただき、深 く感謝の意を表する。

参考文献

- Ahmed, Z. and Lebedev, M., 2018: Elastic properties of sands, Part-1: Micro-CT image analysis of grain shapes and their relationship with microstructure. *Geophys Prospect*, 1–22, doi: 10.1111/1365-2478.12652.
- Caspari, E., Muller, T.M. and Gurevich, B., 2011: Time-lapse sonic logs reveal patchy CO₂ saturation in-situ. *Geophys Res Lett*, 38, 18–21, doi:10.1029/2011GL046959.
- Gassmann, F., 1951. Uber die elastizitat poroser medien. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, 96, 1–23.
- Gurevich, B. and Lopatnikov, S.L., 1995: Velocity and attenuation of elastic waves in finely layered porous rocks, *Geophys. J. Int.*, **121**, 933–947.
- Jackson, S.J. and Krevor, S., 2020: Small-Scale Capillary Heterogeneity Linked to Rapid Plume Migration During CO₂ Storage. *Geophys Res Lett*, 47, doi: 10.1029/2020GL088616.
- Kitamura, K., Honda, H., Nishizawa, O. and Mitani, Y., 2021: Impacts of CO₂ injection speed on two-phase flow and physical parameters in porous sandstone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 107, doi:10.1016/ j.ijggc.2020.103228.
- Kitamura, K., Nishizawa, O., Christensen, K.T., Ito, T. and Finley, R.J.: 2018: Seismic and strain detection of heterogeneous spatial distribution of CO₂in high-permeable sandstone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **72**, 65–73, doi: 10.1016/j.ijggc.2018.03.005.
- Kitamura, K., Xue, Z., Kogure, T. and Nishizawa, O., 2014: The potential of Vs and V_p - V_s relation for the monitoring of the change of CO₂-saturation in porous sandstone. *International*

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

Journal of Greenhouse Gas Control, **25**, 54–61, doi: 10.1016/ j.ijggc.2014.03.013.

- Kobayashi, Y. and Mavko, G., 2016: Variation in P-wave modulus with frequency and water saturation: Extension of dynamic-equivalent-medium approach. *Geophysics*, 81, D479-D494, doi: 10.1190/GEO2015-0045.1.
- Lebedev, M., Toms-Stewart, J., Clennell, B., Pervukhina, M., Shulakova, V., Paterson, L., Muller, T.M., Gurevich, B. and Wenzlau, F., 2009: Direct laboratory observation of patchy saturation and its effects on ultrasonic velocities. *Leading Edge*, 28, 24–27, doi: 10.1190/1.3064142.
- Lei, X. and Xue, Z., 2009: Ultrasonic velocity and attenuation during CO₂ injection into water-saturated porous sandstone: Measurements using difference seismic tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **176**, 224–234. doi: 10.1016/j.pepi.2009.06.001.
- Mavko, G. and Mukerji, T., 1998: Bounds on low frequency seismic velocities in partially saturated rocks. *Geophysics*, 63, 918–924, doi: 10.1190/1.1444402.
- Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J., 2009: *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*. Cambridge university press.
- Muller, T.M. and Gurevich, B., 2004: One-dimensional random patchy saturation model for velocity and attenuation in porous rocks. *Geophysics*, 69, 1166–1172, doi:10.1190/1.1801934.
- Muller, T.M., Gurevich, B. and Lebedev, M., 2010: Seismic wave attenuation and dispersion resulting from waveinduced flow in porous rocks - A review. *Geophysics*, 75, 75A147-75A164, doi:10.1190/1.3463417.
- Nakatsuka, Y., Xue, Z., Garcia, H. and Matsuoka, T., 2010: Experimental study on CO₂ monitoring and quantification of stored CO₂ in saline formations using resistivity measurements. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 209–216, doi:10.1016/j.ijggc.2010.01.001.

- Reynolds, C.A. and Krevor, S., 2015: Characterizing flow behavior for gas injection: Relative permeability of CO₂brine and N₂-water in heterogeneous rocks. *Water Resour Res.*, **51**, 9464–9489, doi:10.1002/2015WR018046.
- Shi, J.Q., Xue, Z. and Durucan, S., 2011: Supercritical CO₂ core flooding and imbibition in Tako sandstone-Influence of sub-core scale heterogeneity. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5, 75–87, doi:10.1016/ j.ijggc.2010.07.003.
- Virnovsky, G.A., Friis, H.A., and Lohne, A., 2004: A Steady-State Upscaling Approach for Immiscible Two-Phase Flow. *Transport in Porous Media*, **2**, 167–192.
- Xue, Z. and Ohsumi, T., 2004: Seismic wave monitoring of CO₂ migration in water-saturated porous sandstone. *Exploration Geophysics*, **35**, 25–32.
- Xue, Z. and Lei. X., 2006: Laboratory study of CO₂ Main migration in water-saturated anisotropic sandstone, based Heading on P-wave velocity imaging. *Exploration Geophysics*, 59, 10–18.
- Zhang, Y., Park, H., Nishizawa, O., Kiyama, T., Liu, Y., Chae, K.-S. and Xue, Z., 2017: Effects of fluid displacement pattern on complex electrical impedance in Berea sandstone over frequency range 104-106 Hz. *Geophysical Prospecting*, 4, 1053–1070.
- Zhang, Y., Nishizawa, O., Kiyama, T., Chiyonobu, S. and Xue, Z., 2014: Flow behaviour of supercritical CO₂ and brine in Berea sandstone during drainage and imbibition revealed by medical X-ray CT images. *Geophys J Int*, **197**, 1789–1807, doi: 10.1093/gji/ggu089.
- Zhang, Y., Nishizawa, O., Kiyama, T. and Xue, Z., 2015: Saturation-path dependency of P-wave velocity and attenuation in sandstone saturated with CO₂ and brine revealed by simultaneous measurements of waveforms and X-ray computed tomography images. *Geophysics*, 80, D403-D415, doi:10.1190/GEO2014-0289.1.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月) 101 ~ 114 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 101~114

講	演
Lecture	

CO₂ 圧入時における砂岩の弾性波速度挙動に関する実験*

青野 哲雄**.[†]·佐野 葡**·水谷 雄太***

(Received November 11, 2024; accepted January 31, 2025)

Elastic wave velocity behavior of sandstone during CO2 injection

Tetsuo Aono, Toru Sano and Yuta Mizutani

Abstract : To realize carbon dioxide capture and storage (CCS), it is essential to have technology to monitor changes in the subsurface when CO_2 is injected deep underground. To this end, the physical properties of rocks in CO_2 injection reservoirs must be properly evaluated, and the application of rock physics experiments in a laboratory environment that reproduces the high temperature and pressure environment of the subsurface will contribute to the reliability and effectiveness of monitoring. In this rock physics experiment, P- and S-wave velocities are measured in core samples taken from oil reservoirs during injection of brine, liquid CO_2 , or supercritical CO_2 at controlled effective pressure and temperature. As a result, the P-wave velocity (Vp) was generally in agreement with the logging data, and the velocity variation with effective pressure (*Pe*) was obtained. The P-wave velocity (Vp) before CO_2 injection in the reservoir was estimated based on the experimental equation of P-wave velocity depending on the effective pressure (*Pe*) during brine injection. The trend of the P-wave velocity (Vp) by the type of injection fluid was also obtained, and the trend of velocity decrease due to CO_2 saturation was characterized for the cases of liquid CO_2 and supercritical CO_2 as pore fluids. For S-wave velocity (*Vs*), the same velocity variation with effective pressure (*Pe*) was obtained as for P-wave velocity (*Vp*). On the other hand, the S-wave velocity (*Vs*) formula. XRD analysis confirmed the presence of siderite as a cause of the higher velocity. The change in mineral composition after CO_2 injection was also observed.

Keywords : supercritical, CO₂, rock physics, elastic wave velocity, porosity, effective pressure, water saturation, attenuation, sequestration, ultrasonic,

1. はじめに

気候変動対策の緩和策の一環として、発電所や工場などの大規模な排出源から排出される二酸化炭素(CO₂)を捕捉し、地下の地層に長期間貯留する二酸化炭素地中貯留技術(CCS:carbon dioxide capture and storage)が注目されている。この技術を達成するためには、貯留されたCO₂が適切に管理され、環境や人々の安全に影響を与えないようにするための一連のプロセスとしてCCSモニタリングが不可欠である。CCSモニタリングは、地下貯留層やその近傍に物理的にアクセスして、CO₂の存在や挙動を直接測定する直接的手法と、地下のCO₂貯留層に直接アクセ

スすることなく地表や遠隔センシングを通じて CO₂ の貯 留状況を推定する間接的手法に大別される。間接的手法の 1 つとして地下貯留層に CO₂ が圧入された際に弾性波速度 が変化する特徴を利用し CO₂ の分布状況を捉える手法が 世界各地で試みられている。

CO₂ 圧入対象層における岩石物理特性を適切に評価する ため、実験室で地下の高温高圧環境を再現し岩石の物理特 性を測定する岩石物理実験を適用することは、モニタリン グ手法の信頼性と効果を高めることに寄与する。

本岩石物理実験では油層から採取したコアサンプルに 対し、有効圧力および温度を制御しながら塩水、液相 CO₂ または超臨界 CO₂ の圧入時の P 波および S 波の弾性波速 度を測定し、有効圧力、CO₂ 飽和率と弾性波速度の関係に ついて考察する。

2. 実 験

2.1 実験概要

本実験では,新潟地域の主要な油ガス層を構成する上部 中新統~下部鮮新統の椎谷層におけるタービダイト成の砂

^{*} 令和6年6月4日,令和6年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱 部門シンポジウム「岩石物理学-E&P事業における成果と脱炭素社 会へ向けた新展開」にて講演-This paper was presented at the 2024 "Geophysical Frontiers - Transforming Exploration & Production for Global Sustainability - "held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

^{**} ENEOS Xplora 株式会社 ENEOS Xplora Inc.

^{***} ENEOS Xplora 株 式 会 社 ENEOS Xplora Inc. (現 ENEOS Xplora BIGST 株式会社 ENEOS Xplora BIGST Sdn. Bhd.)

[†] Corresponding author : E-Mail : aono.tetsuo@eneos.com

泥互層から砂岩 (SST) または凝灰岩 (TUFF) を優勢と する岩相を10か所選定し, 直径1インチ(約2.54 cm), 長さ1.5インチ(約3.81 cm)の円柱状のサンプルを成形 して試験体として用いた。これらサンプルに対し,まず CTスキャンによる内部構造の健全性を確認したのち,ス テップ1としてX線回折(XRD:X-ray diffraction)による 鉱物組成分析および孔隙率・浸透率測定を実施し基礎デー タとした。

次にステップ2として各サンプルに対し、封圧 (Pc: confining pressure) と孔隙水圧 (Pp: pore pressure) を制 御しながら、これらの差圧である有効圧力 (Pe: effective pressure)を調節し,乾燥状態から孔隙流体を塩水 (Brine), 液相 CO₂, 超臨界 CO₂ (drainage: 砂岩に CO₂ を圧入し塩 水と置換),塩水 (imbibition:再度塩水を砂岩に圧入)の 順に連続的に圧入置換させながら,P波およびS波の速度 を測定した。

表1に本実験で用いたサンプルイベントリーを示す。2 つの坑井AとBの同層準の地層からサンプルを採取した。 信頼性のあるデータを取得できたものをチェック印,でき なかったものをNAで示す。ステップ1ではすべてのサン プルについて有意なデータが取得されたが、ステップ2で はデータ品質管理の結果、信頼性の低いデータについては

STEP1 STEP2 Velocity Weight Rho_dry Diameter Length Attenuation Porosity Perm. XRD Dry $Liq.CO_2$ $Sc.CO_2$ Brine imb Well ID Litho Brine Vp Vs Vp Vs Vp Vs Vp Vs Vp Vs Dry Brine CO2 [cm] [cm] [g] [g/cc] [mD] [m/s] % SST 2.503.802 41.71 2.235 NA NA NA NA 1 √ \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark √ \checkmark √ \checkmark 2'SST 2.38 4.020 35.11 1.963 √ √ NA \checkmark √ √ \checkmark \checkmark \checkmark ~ √ NA √ √ √ √ А 2A SST 2.453.880 36.67 2.005 NA √ \checkmark \checkmark √ √ \checkmark NA NA NA 7 1 1 √ 7 7 3.791 1.823 8 TUFF 2.48 33.38 NA √ \checkmark √ \checkmark √ NA NA NA NA NA NA 7 √ √ √ 8' TUFF 2.43 3.820 31.91 1.801 7 NA NA NA NA NA NA NA NA NA √ √ NA NA NA NA 18 3.883 2.016 NA SST 2.4035.41 1 √ √ √ \checkmark √ √ \checkmark NA NA NA NA NA √ √ 19 SST 2.48 3.966 37.98 1.982 √ √ \checkmark \checkmark NA \checkmark \checkmark ✓ \checkmark \checkmark \checkmark NA NA NA √ \checkmark в 23SST 2.48 3 883 37.50 1.999 \checkmark √ \checkmark √ NA \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark NA NA NA NA √ 1 23'SST 2.474.166 37.82 1.895 7 1 \checkmark √ NA \checkmark \checkmark \checkmark \checkmark √ \checkmark \checkmark √ NA NA NA 23''' SST 2.504.46042.45 1.939 √ √ NA √ √ √ √ √ √ NA NA √ \checkmark 1 1 \checkmark





図1 速度測定装置の系統図

孔隙流体として塩水(Brine)(青色系)またはCO₂(赤色系)を孔隙水圧(*Pp*)にて供給する系統と,圧力容器内に設置された サンプルに封圧(*Pc*)を負荷する三軸封圧を制御する圧力系統(黒色系)とからなる。サンプルの両端には弾性波速度を測定す る装置が設置され,圧力容器内はヒーターにより温度調節がなされる。

不採用とした。

図1は速度測定装置の系統図である。測定装置は,孔隙 流体として塩水 (Brine)を供給する系統と CO₂を供給す る系統と,サンプルに負荷する三軸封圧を制御する圧力系 統とからなり,図2に示すような圧力制御プロトコルと呼 ばれる封圧,孔隙水圧の制御プログラムにしたがって各圧 力系統を制御しながら各流体圧入時における弾性波速度を 測定する。

図2の上側のグラフは封圧(Pc)と孔隙水圧(Pp)の各 流体圧入時における圧力制御を示し、図2の下側のグラフ は封圧(Pc)と孔隙水圧(Pp)との差圧である有効圧力(Pe) を示す。なお CO₂ が超臨界状態となるための臨界圧力は 1070.7 psi (7.3825 MPa), 臨界温度は 31.06℃である。

乾燥状態のサンプルに孔隙流体として塩水 (Brine) を十分に圧入浸透させた後に,液相 CO₂,超臨界 CO₂ (drainage),塩水 (imbibition)のステージ順に連続的に圧 入流体を置換させながら封圧 (Pc)と孔隙水圧 (Pp)を 制御し有効圧力 (Pe)が500 psi (約 3.45 MPa)~2500 psi (約 17.2 MPa)の範囲で増減させて P 波と S 波の弾性波速 度を測定した。孔隙流体 CO₂の液相から超臨界への相転 移は,圧力容器内の温度を室温 21℃から 80℃まで昇温さ せることにより変化させた。また塩水 (imbibition)のステー



図2 圧力制御プロトコル

上側のグラフは封圧 (Pc) と孔隙水圧 (Pp) の各流体圧入時における圧力制御を示し、下側のグラフは封圧 (Pc) と孔隙水圧 (Pp) との差圧である有効圧力 (Pe) を示す。



図3 鉱物組成結果

各サンプルの石英(Q:quartz),長石(F:feldspar),粘土鉱物(C:clay)成分について、左図は棒グラフ、右図は鉱物組成三 角グラフで示す。



孔隙率とバルク密度との関係

図4 孔隙率とバルク密度との関係および粒子密度

左図は孔隙率とバルク密度との関係を示すプロット,右図は孔隙率およびバルク密度から計算した各サンプルの粒子密度を示す。

ジでは、圧力容器内の温度を 80℃から室温 21℃まで徐々 に低下させた後に塩水を再圧入して弾性波速度を測定し た。弾性波速度測定には汎用的な超音波を用いた弾性波速 度測定手法(以下,ultrasonic 手法)を採用し、中心周波 数1 MHz(帯域 800 Hz ~ 1.2 MHz)のパルス波を発生させ、 サンプル内を伝播する P 波および S 波の走時を測定し各 速度をもとめた。なお液相 CO₂ および超臨界 CO₂ の流体 置換時において CO₂ の圧入量を測定することにより CO₂ の飽和率を算定した。最後に実験終了後のコアサンプルに 対し XRD 分析を再度実施し CO₂ 圧入前後の鉱物組成の変 化を追跡することを試みた。

2.2 実験結果

2.2.1 基礎データの取得(ステップ1)

図3はXRDによる鉱物組成結果であり左図が棒グラフ, 右図が鉱物組成三角グラフを示す。鉱物組成を主に石英(Q: quartz),長石 (F:feldspar),粘土鉱物 (C:clay) 成分で 分類した。一般に鉱物組成三角グラフは石英(Q)長石(F) と石質岩片 (L: lithic fragments) で分類されることが多 いが、本ケースでは石質岩片(L)が検出限界以下であり無 視できるほどの少量であったため,粘土鉱物 (C:clay) と置き換えた。またサンプル#1のみシデライト(siderite) を含んでいたが、シデライトは堆積岩中で続成作用により 生成したものと考え粘土鉱物 (C: clay) に含めた。特徴 として砂 (SST) は、おおむね粘土鉱物(C) 成分が1~2 割程度を占め、残りの部分については石英(Q)と長石(F) が同程度の割合を示す。一方、凝灰岩(TUFF)は、粘土 鉱物(C)成分が4割強を占め、残りの部分については石英 (Q)と長石(F)が同程度の割合を示す。なお、長石(F)は斜 長石が優勢でカリ長石は含有率が少なく、粘土鉱物(C)は スメクタイト (smectite) が優勢となる。

図4は孔隙率とバルク密度との関係を示すグラフであ る。図4の左図が孔隙率とバルク密度との関係を示すプ ロット,図4の右図は孔隙率およびバルク密度から計算 した各サンプルの粒子密度を示す。Core Lab 社製の CMS-300[™]を使用し封圧 (Pc) を 1000 psi (約 6.90 MPa) ~ 2500 psi(約 17.2 MPa)の範囲で変化させながら乾燥状態 のサンプルにヘリウムを圧入することで孔隙率と浸透率 を測定しバルク密度をもとめた。図4の左図に示すように サンプル#1以外の砂(SST)の孔隙率とバルク密度との 関係はほぼ同一直線状に分布するのに対し、サンプル#1 の砂 (SST) は当該直線から密度の大きい方へかい離する 結果となった。これはサンプル#1には他の砂に含まれな い比重の大きいシデライトを含有するためであると推察さ れる。一方、凝灰岩(TUFF)は砂(SST)よりもバルク 密度が小さい傾向を示した。なお取得した浸透率の結果お よび考察については本報では割愛する。

2.2.2 速度測定(ステップ2)

実験から得られた結果に基づき, 各圧入ステージにおけ る弾性波速度(P波, S波)とCO₂飽和率および有効圧力 (*Pe*)との関係について考察する。

2.2.2.1 P 波速度(Vp)と孔隙率との関係

本実験のサンプルを採取したコア深度周辺における検層 結果と、本実験で得られた P 波速度および孔隙率との比較 を図5のグラフに示す。実線が P 波速度(*Vp*)および全 孔隙率(Φt)であり、丸プロットが本実験から得られた 砂(SST)および凝灰岩(TUFF)の P 波速度(*Vp*)およ び全孔隙率(Φt)である。なお検層データについては掘 削時に対象層に油が検出されていたため、Gassmann (1951)
の流体置換式を適用し原位置における水飽和率から塩水 100%に置換したものを比較した。本実験で測定した P 波 速度 (*Vp*) および全孔隙率 (Φ*t*) は, 室温 21℃で塩水 (Brine) 圧入時の結果である。有効圧力については, 検層深度の有 効圧力 2600 psi (約 1.79 MPa) であるのに対し, 実験では その値に近い有効圧力 2500 psi (約 1.72 MPa) 下で測定さ れた結果を示している。対比結果に示すとおり, 検層結果 と本実験の結果はおおむね整合性が認められる。

図6は、全孔隙率(Φt) と P 波速度(Vp)の関係について、検層結果と本実験の結果を重ね合わせたプロット図

である。図に示すように、各岩相に対応する検層結果のプロット位置に本実験の結果もおおむね位置している。また 全孔隙率(Φt)の減少すなわち圧密にともない P 波速度 (Vp)速度が上昇する調和的なトレンドを示す。さらに砂 (SST)はおおむね constant cement と friable sand の範囲に 収まっており妥当性のある結果が取得された。

2.2.2.2 P 波速度 (*Vp*) と有効圧力 (*Pe*) との関係 図 7 は各サンプルにおける有効圧力 (*Pe*) に対する P 波速度 (*Vp*) の変化を示すグラフである。横軸は有効圧 力 (*Pe*),縦軸は P 波速度 (*Vp*) を示し,灰色実線が乾燥



図5 検層結果と本実験結果との比較

左グラフが P 波速度(Vp),右グラフが全孔隙率(Φt),青実線が検層データ,丸プロットが本実験結果を示す。



図 6 全孔隙率(Φt) と P 波速度(Vp)のプロット図(検層データと実験結果との比較) 検層結果が色丸,本実験結果が白黒丸で示す。

状態 (Dry), 青色実線が塩水 (Brine), 黄色実線が液相 CO₂ (Liq.CO₂), オレンジ色実線が超臨界 CO₂ (Sc.CO₂), 青色破線が imbibition ステージの塩水 (Brine Imb.) を示 す。全体の傾向として, 有効圧力 (*Pe*)の増加とともに P 波速度(Vp)は上昇し,また圧入流体の入れ替えに応じて, 乾燥状態(Dry)が最もP波速度(Vp)が低く,その後塩 水(Brine) 圧入にてP波速度(Vp)が上昇し,液相CO₂ (Liq.CO₂) 圧入により若干のP波速度(Vp)速度が低下(あ



図7 各サンプルにおける有効圧力 (Pe) に対する P 波速度 (Vb) の変化

灰色実線が乾燥状態 (Dry), 青色実線が塩水 (Brine), 黄色実線が液相 CO₂ (Liq.CO₂), オレンジ色実線が超臨界 CO₂ (Sc. CO₂), 青色破線が imbibition ステージの塩水 (Brine Imb.) のステージを示す。グラフ右上の NA の番号は不良のため使用して いないデータを示す。

るいは塩水 (Brine) と同等) し, さらに超臨界 CO₂ (Sc. CO₂) へ推移すると顕著に P 波速度 (*Vp*) の低下が生じ, 最後に塩水 (Brine Imb.) にて塩水 (Brine) とほぼ同等の P 波速度 (*Vp*) に戻るという,各サンプルとも再現性の高 い結果となった。なお,サンプル#1については P 波速度 が全体的に高い値を示している。これは鉱物組成にシデラ イトが含有しているためであることが示唆される。

図8は、有効圧力(*Pe*) に対する塩水(Brine)を基準 として正規化した P 波速度(Nor.*Vp*:Normalized *Vp*)の 結果を示す。各有効圧力(*Pe*)において、塩水(Brine) の P 波速度(*Vp*)を1とした時の、それぞれ孔隙流体圧 入時の速度の比を示している。図7では、サンプルによっ



図8 各サンプルにおける有効圧力 (*Pe*) に対する P 波速度 (*Vp*)の変化(塩水 (Brine)を基準として正規化) 凡例については図7と同じ。

て速度のレンジが区々であったが正規化することにより, 圧入流体による P 波速度の変化を比較しやすくした。塩 水 (Brine)を基準としたのは初生的に塩水 (Brine)を孔 隙水とする貯留層に CO₂の圧入するケースを想定したた めである。

図 8 に示す正規化した P 波速度 (Nor.Vp) グラフのうち, 乾燥状態 (Dry) と塩水 (Brine) に注目してみると,両者 ともに孔隙内の流体が100%の空気または塩水で満たされている状態であるが、乾燥状態(Dry)の正規化P波速度(Nor.Vp)は有効圧力(Pe)の変化とともに変化している。これは飽和率が同じであっても孔隙流体の種類により有効 圧力(Pe)によるP波の速度変化の傾向が異なることを示唆している。一方本実験では、液相CO₂(Liq.CO₂)と 超臨界CO₂(Sc.CO₂)は、有効圧力(Pe)の変化とともに



図 9 有効圧力 (*Pe*) に対する CO₂ 飽和率を示すグラフ 黄色実線が液相 CO₂ (Liq.CO₂), オレンジ色実線が超臨界 CO₂ (Sc.CO₂) のステージを示す。

CO₂ 飽和率も変化している。したがってこの時の速度変化が、有効圧力(*Pe*)の変化によるものか、あるいは CO₂ 飽和率によるものか分離が難しい。

図 9 は各サンプルにおける液相 CO₂(Liq.CO₂)または 超臨界 CO₂(Sc.CO₂)圧入時の有効圧力(Pe)に対する, CO₂ 飽和率を示すグラフである。本実験では、液相と超臨 界 CO₂ 圧入時の free-phase(水に溶解していない CO₂)の CO₂ 飽和率を各有効圧力(Pe)において算出している。詳 細な算出手順は以下のとおりである。

- ① CO₂ 圧入量と孔隙容量を各圧力で測定
- 温度と孔隙水圧および NaCl 濃度 (mol/kg/H₂O) 条件下のCO₂の塩水 (Brine)への溶解度を計算 (Duan and Sun, 2003)
- ③ CO₂密度と対象孔隙容量(サンプル中の塩水 (Brine) 量を含む)から CO₂の塩水 (Brine)への最大溶解 量を決定
- ④ 圧入した CO₂ 量と CO₂ の塩水 (Brine) への最大溶 解量から free-phase の CO₂ 量を算定
- ⑤ 対象孔隙容量に占める free-phase の CO₂ 量の割合か
 ら CO₂ 飽和率と算定

有効圧力 (*Pe*) を 2500 psi (約 17.2 MPa) から 1000 psi (約 6.90 MPa) にかけて変化させている時に, 孔隙水圧は 2000 psi (約 13.8 MPa) から 3500 psi (約 24.1 MPa) まで 上昇させており, それにともない CO₂ の圧入量が増加し ている。図 9 によれば, 各サンプルともおおむね液相 CO₂ と超臨界 CO₂ の飽和率は, 同等ないしは若干超臨界 CO₂ の飽和率が高くなった。

図 10 は、液相 CO₂ (Liq.CO₂) または超臨界 CO₂ (Sc. CO₂) 圧入時における、CO₂ 飽和率と正規化 P 波速度 (Nor. Vp) との関係を示すグラフである。図中の塗りなし丸プロット (〇) が液相 CO₂ を圧入した場合、塗りつぶし丸プロット (●) が超臨界 CO₂ を圧入した場合を示す。また丸プロットの色は、各有効圧力 (Pe) を示す。なおグラフには砂 (SST) への CO₂ 圧入時の速度変化に焦点をしぼり砂 (SST) の測定結果のみを表示している。

前述したように、P波速度(Vp)は、CO₂飽和率のみな らず有効圧力(Pe)にも依存する。本来であれば有効圧力 (Pe)を一定圧力に保ちながらCO₂飽和率を変化させてP 波速度(Vp)を評価するのが望ましい。またサンプルご とに性状が異なる可能性があるため速度変化の特徴も異な るおそれがある。一方、本実験ではサンプル数および測定 方法の制約があるとともに、概略の傾向をつかむ目的で1 つのグラフにまとめた。

図 10 をみると, 超臨界 CO₂ 圧入時の P 波速度は, 圧入 初期段階 (Pe: 2500 psi (約 17.2 MPa), Sc.CO₂:数%) において急激に低下し, その後変化率は緩やかになるが低 下は継続し, 最終的には初期速度から 10 ~ 15%程度の速 度低下を示すことから, この程度の P 波速度 (Vp)の変 化であれば検出可能であると考える。一方, 液相 CO₂ (Liq. CO₂) 圧入時における P 波速度の変化は超臨界 CO₂ (Sc. CO₂) 圧入時と比べて小さい (5%未満)。すなわち, 例え ば貯留層から漏洩した CO₂が超臨界に達しない条件下の 浅い深度まで移動してきた場合においては、その速度変化 から CO₂ を検出することは、貯留層内で移動する CO₂ を 検知するよりも難しくなることを示唆している。

Prasad *et al.* (2021)によれば, CO₂ 圧入時の P 波速度(*Vp*) の変化が, 孔隙中の CO₂ のクラスターサイズ, または弾 性波の周波数に依存することが示されている。図 11 は, 図 10 のプロットのうち超臨界 CO₂ 圧入時の P 波速度のプ ロットを抜粋したものに, クラスターサイズおよび弾性 波の周波数による P 波速度(*Vp*)の変化の傾向を参考ラ インとして付記したものである。

図 11 に示すように、クラスターサイズが大きくなる (patchy) につれて P 波速度(Vp)の変化は線形に近づ き、クラスターサイズが小さくなる(uniform)につれて、 Gassmann (1951)の流体置換の式に近くなる。また、弾 性波の周波数についても、高周波になるにつれて線形に近 くなり、低周波になるほど Gassmann (1951)の流体置換 式に近くなる。本弾性波速度測定では汎用的な ultrasonic 手法を用いており、通常の地震探査で取り扱う弾性波周波 数帯域よりも高い周波数帯域を適用しているので周波数依 存性にも考慮する必要がある。本実験はこれら両者が組み 合わさった条件であるため、今後我々がモニタリングで 取り扱う CO₂ 圧入による弾性波速度変化の傾向を検討す る際には注意が必要である。西澤ほか(2016)によれば、 drainage と imbibition とでクラスターパッチのサイズが異 なる場合もあるため、各ステージでも飽和率と速度の関係



図 **10** CO₂ 飽和率による P 波速度の変化 (SST のみ) 塗りなし丸プロット (○) が液相 CO₂ 圧入時, 塗りつぶし 丸プロット (●) が超臨界 CO₂ を圧入した場合を示す。丸 プロットの色は, 各有効圧力 (*Pe*) を示す。

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

が異なる可能性があることを念頭に入れる必要がある。本 実験では、データのサンプリング数も限りがあったため、 CO2 圧入時の P 波速度(Vp)の変化の定式化の検討まで



図 11 CO₂ 飽和率による P 波速度の変化(超臨界 CO₂ 圧入時のみ)

黒実線は CO₂のクラスターサイズが大きい(patchy)または 弾性波周波数が高周波の場合の参考曲線,赤実線は CO₂の クラスターサイズが小さい(uniform)または低周波の場合 の参考曲線(Gassmann(1951)の流体置換式)を示す。 は至っていないが,引き続き本実験の課題も含めて検討し ていく予定である。

次に有効圧力 (Pe) と P 波速度 (Vp) との関係につい て考察する。有効圧力 (Pe) と P 波速度 (Vp) との関係 については種々の近似式が提案されている。本実験では Zoback et al. (1989) の近似式をサンプル #1 の結果に適 用した。図 12 は、サンプル #1 の有効圧力 (Pe) と P 波 速度 (Vp) との関係を示すグラフであり、実線が実測値、 破線が近似式により推定された速度トレンドである。

図 12 に示す近似式の係数 ABC の推定に Microsoft Excel のソルバー機能 (GRG: generalized reduced gradient method, 一般化簡約勾配法)を使用した。本サンプルを 採取した対象層は、油を生産開始時に孔隙水圧(Pb)が 3400 psi (約 23.4MPa) あったところ, 生産停止時には 2000 psi(約 13.8 MPa)まで減退している。対象深度から 想定される封圧 (Pc) が 6000 psi (約 41.3 MPa) である と仮定すると有効圧力(Pe)は生産開始時の 2600 psi(約 17.9 MPa)から生産停止時の 4000 psi(約 27.6 MPa) に増 加しているものと推定される。例えばこの時点から CO2 を圧入した場合、生産停止時のP波速度(Vb)がベース ラインとなり, 超臨界 CO2 を圧入した場合は孔隙水圧 (Pp) の増加にともない有効圧力(Pe)が減少し、さらにCO2 飽和率の増加により P 波速度(Vb)が低下すると推定さ れる。もっとも、この実験は ultrasonic 法を用いた高周波 数帯域(MHz オーダー)での実験結果でのものあり、実 際の地震探査や VSP などで測定される周波数帯域(数 Hz ~数百 Hz)と比べて低いため速度の分散性についても考 慮すべきである。



有効圧力(Pe) - P波速度(Vp)の関係

 $V = A + B(Pe - e^{-CPe})$

引用文献:Zoback el al.(1981),Geophysics

計算結果※ Туре A В C Pe 計算値 実測値 RMS残差 1000 18.80 4292 4273 2000 4361 4375 14.40 3235 Vp Brine 14638 1.36E+00 3000 4429 4457 27.60 4000 4498 4475 23.20 1000 2874 2874 0.02 2000 3193 3193 0.08 Vp Dry 4418 1041 1.77E-03 3000 3390 3390 0.12 4000 3515 3515 0.06

※ A,B,Cの推定にはMS Excelのソルバー機能 (GRG非線形)を使用

図12 サンプル#1の有効圧力 (Pe) と P 波速度 (Vp) との関係

左図のグラフの色は各圧入ステージにおける有効圧力(Pe)とP波速度(Vp)との関係を示し,実線が実測値,破線が推定値を示す。 右の表は推定値を導出した近似式の計算結果を示す。 2.2.2.3 S波速度(Vs)と有効圧力(Pe)との関係 図 13 は各サンプルにおける有効圧力(Pe)に対するS 波速度(Vs)の変化を示すグラフである。凡例は図7に示 す有効圧力(Pe)とP波速度(Vp)との変化を示すグラ フと同様である。なお、本坑井においてS波速度(Vs) の検層データは取得されておらず、本実験との対比はおこ なっていない。また乾燥状態(Dry)のS波速度(Vs)に ついては再現性が乏しかったためプロットから除いた。 一般的に ultrasonic 法における S 波速度 (Vs) の測定は, PS 波の変換波と直達 S 波が干渉するおそれがあるため, P 波 速度 (Vp) の測定よりも難しい。図 13 に示すように S 波 速度 (Vs) も,有効圧力 (Pe)の増加とともに上昇する傾 向を示す。なお塩水 (Brine),液相 CO₂ (Liq.CO₂),超臨 界 CO₂ (Sc.CO₂) および塩水 (Brine Imb.) 圧入時の S 波



図13 各サンプルにおける有効圧力 (Pe) に対するS波速度 (Vs) の変化

速度(Vs)はほぼ同じトレンドを示した。一方,超臨界 CO₂ 圧入時においてはS波速度(Vs)がいずれのサンプル においても速度低下が生じた。 図 14 は、有効圧力 (Pe) と正規化した S 波速度 (Nor. Vs: Normalized Vs) との関係を示すグラフである。塩水 (Brine) の S 波速度 (Vs) を基準として他の孔隙流体圧入



図14 有効圧力 (Pe) に対するS波速度 (Vs) の変化 (塩水 (Brine) を基準として正規化)

時のS波速度(Vs)を正規化している。図15は、液相CO₂(Liq. CO₂)または超臨界CO₂(Sc.CO₂)圧入時における、CO₂ 飽和率と正規化S波速度(Nor.Vs)との関係を示すグラフ である。凡例については図10に示すグラフと同様である。

これら図に示すように,液相 CO₂ (Liq.CO₂) 圧入時に おける S 波速度 (Vs) の変化は,ほとんど見受けられない。 一方,超臨界 CO₂ 圧入による S 波速度 (Vs) の変化は, CO₂ 飽和率の増加にともなって 10 ~ 15%程度の低下が認 められた。Gassmann (1951) の S 波速度 (Vs) の式によ れば,孔隙流体の種類に応じて剛性率 (μ sat) は依存せず, バルク密度 (ρ sat) のみに依存するため,超臨界 CO₂ (Sc. CO₂) に置換した場合,バルク密度 (ρ sat) が小さくなる 方向に変化し,結果 S 波速度 (Vs) が塩水 (Brine) より も増加する傾向となるはずである。しかしながら本実験で は S 波速度 (Vs) が減少する逆の傾向を示している。

CO₂ 圧入にともない岩石マトリックスに何らかの化学変 化が生じS波速度(Vs)に影響を与える可能性についても 考えられるが、サンプル#2、#2A、#23'の測定で取得 した imbibition (Brine Imb.)ステージにおけるS波速度(Vs) は、CO₂ 圧入前の塩水(Brine) 圧入時の速度と同程度に 戻っているので、その可能性は低い。ここでS波速度(Vs) に影響を与えうる条件の1つとして考えられるのが温度で ある。CO₂ を超臨界状態にするために圧力容器内の温度を 室温 21℃から 80℃まで昇温させており、それ以外の測定 は室温 21℃で実施されている。その他にもS波速度(Vs) への周波数依存性などについてもS波速度(Vs)に影響を 与える可能性があるが、引き続きこれらの現象解明につい て検討していく予定である。

2.2.3 XRD (CO₂ 圧入前後の比較)

図 16 は、基礎データ (ステップ1) および速度測定 (ス テップ2) 後の各サンプルの XRD 分析の結果の比較した ものである。図中棒グラフは、左側が CO₂ 圧入前の基礎デー タ (ステップ1)、右側が CO₂ 圧入後の速度測定 (ステッ プ2) 後の鉱物組成を示す。図に示すように、サンプル#1



図 15 CO₂ 飽和率による S 波速度の変化 (SST のみ)





各サンプルの石英(Q:quartz),長石(F:feldspar),粘土鉱物(C:clay)成分について,左図は棒グラフ,右図は鉱物組成三 角グラフで示す。左図の各サンプルの左側(b)がCO₂ 圧入前の基礎データ(ステップ1),右側(a)がCO₂ 圧入後の速度測定(ステッ プ2)後の鉱物組成を示す。右図の塗りつぶし丸プロット(○)がCO₂ 圧入前,塗りなし丸プロット(●)がCO₂ 圧入後を示し ており,相転移がわかるように線で結んでいる。 以外はおおむね,粘土鉱物(C:clay)成分が微減している。 右図は鉱物組成の三角グラフであり,図中の塗りつぶし丸 プロット(●)が CO₂ 圧入前,塗りなし丸プロット(○) が CO₂ 圧入後を示しており,相転移が分かるように線で 結んでいる。石英(Q)と長石(F)の比率はほぼ同等で CO₂ 圧入前と比べて変化はなく,clay成分だけが減少している ように見て取れる。なお,XRD 分析では CO₂ 圧入後に新 しく生成された鉱物の特定することまでは困難であった。

3. まとめ

本岩石物理実験では油層から採取したコアサンプルに対し、有効圧力 (Pe) および温度を制御しながら塩水 (Brine), 液相 CO_2 , 超臨界 CO_2 (drainage),塩水 (imbibition)の 順に連続的に圧入置換させながら、P 波および S 波の速度 を測定し以下のような結果を得た。

P波速度(Vp)については、おおむね検層データと調和 的な結果を取得し、有効圧力(Pe)に応じた速度変化を取 得した。また乾燥状態(Dry)および塩水(Brine)圧入時 の有効圧力(Pe)に応じたP波速度の実験式をもとめ貯 留層におけるCO2圧入前のP波速度(Vp)を推定した。 また圧入流体の種類に応じたP波速度(Vp)変化の傾向 を得た。CO2飽和率を算出しその飽和率による速度低下の 傾向を孔隙流体が液相CO2と超臨界CO2の場合とでそれ ぞれ特徴を得た。

S 波速度 (Vs) については, P 波速度 (Vp) と同様に有 効圧力 (Pe) に応じた速度変化を取得した。一方, 超臨界 CO₂ 圧入時に速度低下を示し, Gassmann (1951) の S 波 速度 (Vs) の式による想定とは逆の傾向を示した。

XRD 分析では、速度高速度化の一因としてシデライト 含有を確認した。また CO₂ 圧入後の鉱物組成の変化をと らえた。

4. 課題と今後の展開

本実験では、塩水 (Brine)、液相 CO₂, 超臨界 CO₂ (drainage),塩水 (imbibition)を孔隙流体としてサンプル に連続的に圧入置換しながら弾性波速度を測定し、各孔隙 流体における有効圧力 (*Pe*) や CO₂ 飽和率に対する P 波 または S 波の応答を定式化することを試み、以下のような 課題を認識した。

P波の速度測定の結果により, 孔隙流体の種類によって 有効圧力(Pe)に対するP波の速度変化の傾向が異なる ことを示唆した。したがって本実験のような孔隙流体を連 続的に圧入置換する場合は,有効圧力(Pe)とCO₂飽和 率が同時に変化するため各パラメータに対する速度の傾向 を別々に確認することができなかったため定式化は困難で あった。S波の速度測定の結果により,超臨界CO₂圧入時 に速度低下を示し,Gassmann(1951)のS波速度(Vs) の式による想定とは逆の傾向を示したがその原因につい ては解明できていない。またXRD分析の結果によれば, CO₂圧入後の鉱物組成の変化が具体的な鉱物までは確認で きていない。 今後の展開として、まず孔隙内に CO₂ 飽和率 100%に近い状態になるように CO₂ を十分充填するとともに、温度・ 圧力調節により液相 CO₂ または超臨界 CO₂状態に制御し、 有効圧力 (*Pe*) に対する速度特性を取得することが必要で あると考える。すなわち孔隙流体を単一にすることにより、 有効圧力 (*Pe*) に対する速度特性を単純化することができ る。一方で CO₂ 飽和率に対する速度特性を知るためには、 有効圧力 (*Pe*) を一定に保ちながら孔隙内の CO₂ 飽和率 を変化させる必要があり、これを実現するためには実験手 法のさらなる工夫が必要である。

また本実験での弾性波速度測定では汎用的な ultrasonic による速度測定手法を適用した。しかしながら,その測定 法の制約上,高周波数帯(MHz オーダー)の波の速度測 定に限定される。一般に岩石を伝播する弾性波速度はそ の周波数により変化する分散特性を示す。一方,CCS モ ニタリングに利用される弾性波の周波数帯は数 Hz ~数百 Hz 程度であり,本実験で測定した弾性波速度の周波数帯 と異なるため実際のモニタリング時に測定される波の速度 と異なる。次のステップとして本実験で得られた圧力制御 および流体置換の知見を適用するとともに,低周波数帯(数 Hz ~数百 Hz 程度)における岩石の弾性波速度の測定を 検討中である。これにより CCS モニタリングを実施する にあたり,実フィールドにて想定される CO₂ 圧入時の弾 性波速度を取得し,より実用的な弾性波速度の定式化を目 指していきたい。

謝 辞

本実験を実施するにあたり、コロラド鉱山大学および ENEOS Xplora 株式会社(中条事業所, e-テクノロジー・ イノベーションセンターほか)の機関に多大なご支援ご協 力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Duan, Z. and Sun, R., 2003: An improved model calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533K and from 0 to 2000 bar. *Chemical Geology*, **193**, 257–271.
- Gassmann, F., 1951: Über die Elastizität poröser Medien. Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, **96**, 1–23.
- 西澤 修,張 毅,薛 自求,2016:岩石物性研究と CO₂地中貯留 II:砂岩における CO₂飽和度と P 波速度変 化.物理探査,69(3),195-214,doi:10.3124/segj.69.195.
- Prasad, M., Glubokovskikh, S., Daley,T., Oduwole, S., and Harbert, W., 2021: CO₂ messes with rock physics. *The Leading Edge*, 40 (6), 392–472, doi: 10.1190/tle40060424.1.
- Eberhart-Phillips, D., Han, D-H., and Zoback, M. D., 1989: Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. *The Leading Edge*, 54 (1), 13–130, doi: 10.1190/1.1442580.

石油技術協会誌 第 90 巻 第 2 号 (令和 7 年 3 月) 115 ~ 121 頁 Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology Vol. 90, No. 2 (March, 2025) pp. 115~121

講 演 Lecture

傾斜薄互層の力学特性に関する考察と岩石物理学*

柏原 功治**.[†]•山本 哲也**

(Received February 5, 2025; accepted February 26, 2025)

Rock physics and petrophysics for geomechanical modeling of dipping thin layers

Koji Kashihara and Tetsuya Yamamoto

Abstract: This study demonstrates the potential for improved accuracy in geomechanical risk assessment by employing rock physics modeling to account for geological effects on sonic velocity logs. Geomechanical models that rely solely on sonic velocity logs without fully considering geological factors such as rock compaction, shale volume, dip angle, and gas saturation can lead to inaccurate wellbore stability evaluations. Using real field logging data from an inclined thin-layered sandstone-shale sequence, we quantitatively evaluated the impact of these factors on sonic velocities through rock physics modeling. These corrected velocity data were then used to construct a more appropriate geomechanical model, resulting in improved accuracy of wellbore stability analysis. Our results highlight the importance of integrating rock physics modeling into geomechanical workflows for enhanced reliability in geomechanical risk assessment of complex reservoirs.

Keywords: rock physics, petrophysics, geomechanical model, sonic velocities, wellbore stability

1. はじめに

石油開発分野ではジオメカニクスが関与する数々の問題 を取り扱う。探鉱,掘削,仕上げ,生産,減退,廃鉱といっ たフィールドライフを通じて,地層圧力予測,坑壁安定性 評価,出砂評価,貯留層圧密などの検討が行われる。近年 のシェール革命以降では水圧破砕・坑井刺激が特に注目を 浴びた。最近では二酸化炭素の地下圧入にも関連して断層 安定性評価が重要視されつつある。これらの検討では地層 を形成する岩石の変形と破壊を考察の対象として,岩石に 作用する応力と,岩石が持つ変形や強度に関する物理的性 質を比較する。このために応力や岩石の力学特性の定量的 な推定を行う。こうしたジオメカニクスに関する近年の検 討においてはジオメカニカルモデルの構築が中心的な役割 を担うとともに,ジオメカニカルモデルを用いた検討・評 価の流れが確立されてきた。ジオメカニカルモデルとは, 応力,間隙圧力,岩石の力学特性の推定値の空間分布を表 現した数値モデルである。特に坑跡に沿って構築したジオ メカニカルモデルを 1D ジオメカニカルモデルと呼ぶ。

1D ジオメカニカルモデルの構築には検層データが利用 されるが、中でも弾性波速度検層データが最も重要な役割 を担う。一方、地層の弾性波速度およびその測定値はさま ざまな要因に影響を受けることが知られており、そのまま 使用すると不適切なジオメカニカルモデルを構築する可能 性があると考えられる。弾性波速度検層の測定値に影響を 与える要因を理解し、必要に応じて補正を加えることで検 討目的に適したジオメカニカルモデルを構築することが可 能となり、ひいてはジオメカニクスが関与するさまざまな 問題に対して、その評価の信頼性が向上すると考えられる。 本稿では、弾性波速度検層にさまざまな角度から影響を与 えることが知られる傾斜薄互層を題材として取り上げ、そ の影響について定量的な考察を行うための岩石物理モデル を考える。

2. ジオメカニカルモデルの構築手順

1D ジオメカニカルモデルの構築の流れを図1に示す。 検層データから与えられる P 波速度, S 波速度, 密度のデー タを入力として, これらに理論式または経験式を適用して, ヤング率, ポアソン比,内部摩擦角,一軸圧縮強度などの 力学特性,間隙圧力,垂直応力,最小水平応力,最大水平 応力を推定する。検層データを入力とするため,坑井沿い

^{*} 令和6年6月4日令和6年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門 シンポジウム「岩石物理学-E&P事業における成果と脱炭素社会へ向 けた新展開-」にて This paper was presented at the 2024 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Geophysical Frontiers – Transforming Exploration & Production for Global Sustainability –" held in Tokyo, Japan, June 4, 2024.

^{**} 石油資源開発株式会社 Japan Petroleum Exploration

[†] Corresponding author : E-Mail : koji.kashihara@japex.co.jp

に連続的な推定が得られる。これをキャリブレーション データによって、応力、間隙圧力、岩石の力学特性の実測 値と整合するようにキャリブレーションを行う。代表的な キャリブレーションデータとして、リークオフテストデー タ、坑井圧力データ、岩石試験データなどが挙げられる。

岩石の力学特性は、変形に関する係数と破壊強度に関す る係数に分けられる。変形係数(ヤング率,ポアソン比など) については、密度、P波速度、S波速度から理論的に計算 することができる。ただし、ここで得られるのは動的係数 であるため、ジオメカニクスの検討に利用するためには静 的係数に変換する必要がある。これには確立された方法が なく、多くの場合には経験式が利用されるため、キャリブ レーションが重要である。強度定数(内部摩擦角,一軸圧 縮強度など)に関しては理論的な変換式が存在せず、経験 式(例えば McNally, 1987; Lal, 1999)を利用して推定する。 岩石の種類やフィールドに応じて数多くの経験式(Chang *et al.*, 2006; Zoback, 2007)が提案されているが、その多 くは P波速度を入力としている。

間隙圧力の推定にはトレンドライン法がしばしば利用される。トレンドライン法とは、検層データ上で静水圧トレンドを解釈し、そのトレンドラインと検層測定値の差から間隙圧力を推定するものである。検層データにはP波速度検層、比抵抗検層、密度検層などが利用される。トレンドライン法の代表的な手法がイートン法(Eaton, 1975)である。

応力の推定には多項式弾性体の構成方程式がよく利用される。

$$S_{h_{min}} = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)(S_{\nu} - \alpha P_{\rho}) + \frac{E}{1-\nu^{2}}\varepsilon_{h_{min}} + \frac{E\nu}{1-\nu^{2}}\varepsilon_{H_{max}} + \alpha P_{\rho}$$
(1)

$$S_{H_{max}} = \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right) (S_{\nu} - \alpha P_{p}) + \frac{E}{1-\nu^{2}} \varepsilon_{H_{max}} + \frac{E\nu}{1-\nu^{2}} \varepsilon_{h_{min}} + \alpha P_{p}$$
⁽²⁾

 $S_{h_{min}}$ および $S_{H_{max}}$ はそれぞれ最小水平応力および最大水平応力である。 S_{n} は垂直応力で、先に与えた密度データを



図1 1D ジオメカニカルモデル構築の手順

深度方向に積分して得られる。 P_{ρ} は間隙圧力, Eはヤン グ率、 ν はポアソン比である。また、 ε_{hmin} および ε_{Hmax} は それぞれ最小水平応力方向および最大水平応力方向のひず み、 α はビオ係数である。ここで強調したいことは、間隙 圧力、ヤング率、ポアソン比の推定にP波速度が利用さ れること、つまり応力の推定においてもP波速度が関与 するということである。

検討対象のフィールドまたは坑井において,ジオメカニ カルモデルの入力となる P 波速度,S 波速度,密度の検層 データが全て取得されているとは限らない。特にS 波速度 データはこれまで取得されない場合が多かった。P 波速度 のみが利用可能という場合には,P波速度と密度あるいは P 波速度とS 波速度の関係式を利用して密度およびS 波速 度を推定することがある。そのことを鑑みてもジオメカニ カルモデルはP 波速度データに極めて強く依存すること が分かる。

3. 傾斜薄互層における検層データへの影響

P 波速度データがジオメカニカルモデルの構築に強く関 与する一方で、P波速度検層の測定値はさまざまな要因に よって変動する。さまざまな要因が同時に作用する場面と して、ここでは傾斜薄互層を取り上げる。図2に実フィー ルドで取得された検層データの例を示す。縦軸がP波速度, 横軸が密度を表し、表示色は暖色系ほど含泥岩率が高いこ とを示す。比較のため Gardner et al. (1974) による密度と P 波速度の関係を重ねて表示した。傾斜した砂岩および泥 岩の薄層によって形成される互層においてP波速度およ び密度に影響を与える要因として,深度(圧密),含泥岩率, ガス飽和率、地層および坑井の傾斜などが考えられる。こ れらの要因が変化(増加)した時のP波速度および密度 の挙動を,図2上に赤色矢印にて概念的に示す。まず,深 度の増加による圧密の影響は、孔隙率の低下に伴う密度お よびP波速度の上昇として現れる。また、互層を形成す る薄層泥岩と薄層砂岩の割合に応じて測定値は変化する。 今回のフィールドでは含泥岩率の上昇とともに密度、P波 速度とも上昇する。ただし、密度は含泥岩率に比例して増 加するのに対し、P波速度は低速度層に支配されて上昇量 は抑制されると考えられる。ガス飽和率の変化に対しては, やや複雑な挙動を示すと考えられる。P波速度は少量のガ スによって大きく減少するが、さらなるガス飽和率の上昇 に対しては(密度の低下のために)わずかに上昇すると考 えられる。一方、密度はガス飽和率の上昇に比例して単調 に減少する。傾斜に関しては、地層の傾斜と坑井の傾斜の 影響を含むため、坑井の掘削方向と地層面の法線方向との 間の角度を定義する(図3)。この相対角度が小さい時(つ まり地層面に対して坑井が垂直に近い時)には、速度検層 ツールの送信機から受信機に伝わる弾性波は必ず低速度層 を通過するが、相対角度が大きい時には高速度層を選択的 に伝わると考えられる。したがって坑井と地層の相対角度 の増加とともにP波速度は上昇するが、密度は変化しな いと思われる。



図2 傾斜薄互層で取得されたP波速度と密度の関係



図3 坑井と地層の相対角度の定義

傾斜薄互層での速度検層および密度検層に影響を与える 要因として,圧密,含泥岩率,ガス飽和率,地層傾斜を挙 げたが,おのおのの影響は重なったり打ち消しあったりし て測定値が得られるため,測定値から個々の要因を逆解析 的に定量評価したり,図2のプロットから解釈したりする ことは困難である。そこで,上記要因による弾性波速度へ の影響を定量的に議論するための岩石物理モデルを考える こととする。

4. 傾斜薄互層の岩石物理モデル

本章では、上述の要因による弾性波速度への影響を表現 するための岩石物理モデルを利用し、検層分解能以下の厚 さの薄層砂岩および薄層泥岩から構成される互層の代表物 性値(有効媒質)を推定して、これを実際の検層データと 比較する。

4.1 圧 密

地層を形成する岩石は埋積深度の増加とともに機械的な 圧密によって孔隙率が減少する。深度と孔隙率の関係は多 くの研究者により世界中のさまざまな地域で議論されてき た (Puttiwongrak *et al.*, 2020) が,本検討においては次式 の指数関数 (Rubey and Hubbert, 1959) を用いて圧密に伴 う孔隙率の減少を表現することとする。

$$\phi = \phi_0 e^{-cZ} \tag{3}$$

上記の深度と孔隙率の関係がある時の岩石の体積弾性 率および剛性率は未固結砂岩モデル(Dvorkin and Nur, 1996)で表現することとした。この岩石物理モデルでは 次式に示すとおり、臨界孔隙率における弾性率をHertz-Mindlin モデルで与え、それ以下の孔隙率における弾性率 を Hashin-Shtrikman 修正下限式で与える。

$$K_{eff} = \left[\frac{\phi/\phi_c}{K_{HM} + 4\mu_{HM}/3} + \frac{1 - \phi/\phi_c}{K_s + 4\mu_{HM}/3}\right]^{-1} - \frac{4}{3}\mu_{HM}$$
(4)

$$\mu_{eff} = \left[\frac{\phi/\phi_c}{\mu_{HM} + z} + \frac{1 - \phi/\phi_c}{\mu_s + z}\right]^{-1} - z_{HM}$$
(5)

$$z_{HM} = \frac{\mu_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8\mu_{HM}}{K_{HM} + 2\mu_{HM}} \right)$$
(6)

 ϕ_{e} は臨界孔隙率で、本検討では泥岩が 0.8、砂岩が 0.6 と した。 ϕ は孔隙率、 K_{s} および μ_{s} はそれぞれ鉱物粒子の体 積弾性率および剛性率である。 K_{HM} および μ_{HM} はそれぞれ Hertz-Mindlin モデルによる体積弾性率および剛性率であ り、それぞれ式(7)および式(8)にて与えられる。

$$K_{HM} = \left[\frac{C^2 (1-\phi)^2 \mu_s^2}{18\pi^2 (1-\nu_s)^2} P\right]^{1/3}$$
(7)

$$\mu_{HM} = \frac{5 - 4\nu_s}{5(2 - \nu_s)} \left[\frac{3C^2(1 - \phi)^2 \mu_s^2}{2\pi^2(1 - \nu_s)^2} P \right]^{1/3}$$
(8)

上記の未固結砂岩モデルで与えられる体積弾性率および 剛性率をそれぞれ K_{ary} および μ_{ary} とし、それらを粒子骨 格とする岩石の飽和状態での弾性定数 K_{sat} および μ_{sat} は Gassmannの流体置換式で与えた。

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - K_{dry}/K_s)^2}{\phi/K_{fl} + (1 - \phi)/K_s - K_{dry}/K_s^2}$$
(9)

$$\mu_{sat} = \mu_{drv} \tag{10}$$

こうして推定した体積弾性率,剛性率および密度から P 波速度および S 波速度を算出した。

4.2 含泥岩率

薄互層の端成分となる砂岩と泥岩の弾性率を前項にて

J. Japanese Assoc. Petrol. Technol. Vol. 90, No. 2 (2025)

推定した。両者が形成する互層はバッカス平均(Backus, 1962) を用いて垂直横等方性(vertically transverse isotropy:VTI) 媒質にアップスケールすることができる。 砂岩または泥岩の弾性テンソルは5つの独立パラメータを 用いて式(11)のとおり記述される。

$$C_{i} = \begin{bmatrix} a_{i} & a_{i} - 2e_{i} & b_{i} & 0 & 0 & 0 \\ a_{i} - 2e_{i} & a_{i} & b_{i} & 0 & 0 & 0 \\ b_{i} & b_{i} & c_{i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{i} \end{bmatrix}$$
(11)

ただし、端成分としての泥岩および砂岩は等方媒質である と仮定し、 $b_i = a_i - 2e_i$, $a_i = c_i$, $d_i = e_i$ とする。この時、 有効媒質としての互層の弾性テンソルは式(12)で記述する ことができる。

$$C_{eff} = \begin{bmatrix} A & A-2E & B & 0 & 0 & 0 \\ A-2E & A & B & 0 & 0 & 0 \\ B & B & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E \end{bmatrix}$$
(12)
$$A = \langle a - b^2 c^{-1} \rangle + \langle c^{-1} \rangle^{-1} \langle b c^{-1} \rangle^2$$
$$B = \langle c^{-1} \rangle^{-1} \langle b c^{-1} \rangle$$
$$C = \langle c^{-1} \rangle^{-1}$$
$$D = \langle d^{-1} \rangle^{-1}$$
$$E = \langle e \rangle$$

ここで 〈・〉 は含泥岩率に応じた加重平均を表す。

互層の密度(ρ) については,砂岩および泥岩の密度の 含泥岩率に応じた加重平均(算術平均)で求めることがで きる。また P 波速度および S 波速度(地層傾斜がない場合) は,それぞれ式(13)および式(14)から得られる。

$$V_{p_0} = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$
(13)
$$V_{s_0} = \sqrt{\frac{D}{\rho}}$$
(14)

4.3 地層傾斜

地層または坑井が傾斜した場合の弾性波速度は Thomsenパラメータ(Thomsen, 1986)を用いて近似する ことができる。Thomsenパラメータは上述の弾性テンソ ルパラメータを用いて以下のように記述される。

$$\varepsilon = \frac{A - C}{2C} \tag{15}$$

$$\delta = \frac{(B+D)^2 - (C-D)^2}{2C(C-D)}$$
(16)

$$\gamma = \frac{E - D}{2D} \tag{17}$$

坑井の掘削方向と地層面の法線方向の間の角度をθとした時の弾性波速度は式(18)~式(20)にて近似することができる。

$$V_{p}(\theta) \approx V_{p_{0}}(1 + \delta \sin^{2}\theta \cos^{2}\theta + \epsilon \sin^{4}\theta)$$
(18)

$$V_{sv}(\theta) \approx V_{s_0} \left[1 + \left(\frac{V_{p_0}}{V_{s_0}} \right) (\varepsilon - \delta) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \right]$$
(19)

$$V_{sb}(\theta) \approx V_{sc} \left(1 + \gamma \sin^2 \theta\right) \tag{20}$$

密度については傾斜の影響を考えない。

4.4 ガス飽和率

砂岩層がガスを含む場合の検層応答については Gassmannの流体置換式を用いて検討した。水とガスが混 在する時の孔隙流体の弾性率は、ガス飽和率に応じた加重 平均で推定した。ただし、ここでは水とガスが均質に混合 するものとして調和平均を使用した。こうして算出した流 体弾性率を使用し、4.1項に記述した未固結砂岩モデルに 対して流体置換を適用して、ガス飽和率に応じた弾性率を 推定した。密度に関しては、ガスと水の混合流体の密度を 算術平均で与え、これと鉱物粒子密度との孔隙率に応じた 算術平均によって推定した。なお、泥岩層については水飽 和を仮定してガスは含まないものとした。



図4 岩石物理モデルを用いた傾斜薄互層の検層応答 モデリングの流れ

石油技術協会誌 90 巻 2 号 (2025)



図5 岩石物理モデルを用いて推定した検層応答と検 層データの比較

以上の岩石物理モデルを用いた傾斜薄互層の検層応答モ デリングの流れを図4に示す。まず、端成分となる薄層砂 岩および薄層泥岩の圧密曲線を仮定した後、それぞれの速 度は未固結砂岩モデルを用いて推定する。ガスの影響につ いては流体置換によって考慮する。それらが形成する薄互 層の弾性率はバッカス平均で与え、傾斜の影響は異方性パ ラメータを用いて推定する。こうして推定した密度および P 波速度の検層応答を、図2のプロットに用いた坑井の中 の1つの坑井から取得された検層データと比較した(図 5)。密度および P 波速度の検層データ(緑色実線)に対し、 推定した密度および P 波速度をそれぞれ青点印および赤 点印で重ねて表示した。参考のため、端成分である泥岩お よび砂岩の密度または P 波速度を茶色実線および黄色実 線でそれぞれ示した。実際には、ここで十分な一致が得ら れるように 4.1 節に記した圧密に関するパラメータと、鉱 物の弾性率および密度を調整した。

5. 坑壁安定性評価への影響

坑井の掘削に際して, 泥水比重が大き過ぎると, 最大水 平応力の方向に引っ張りき裂を生じ, 逸泥につながる可能 性がある。逆に泥水比重が小さ過ぎると, 最小水平応力の 方向にせん断破壊(ブレークアウト)を生じ, 崩れた岩片 が掘削ツールを抑留する懸念がある。こうした掘削トラブ ルを回避するため, 坑壁の破壊を起こさないように泥水比 重を調整する。坑壁安定性評価では, 坑壁に引っ張り破壊 もせん断破壊も発生させないような泥水比重の範囲を推定 する。引っ張り破壊を起こさない条件が泥水比重の上限値, せん断破壊を起こさない条件が下限値を与えることとなる。

垂直井の坑壁に作用する応力は円筒座標系において次のように記述される(Kirsch, 1898)。

$$\sigma_{\theta\theta} = S_{H_{max}} + S_{h_{min}} - 2(S_{H_{max}} - S_{h_{min}})\cos 2\theta - P_p - P_w - \sigma^{\Delta T}$$
(21)

$$\sigma_{zz} = S_V - 2\upsilon \left(S_{H_{max}} - S_{h_{min}} \right) \cos 2\theta - P_p - \sigma^{\Delta T}$$
(22)

$$\sigma_{rr} = P_w - P_b \tag{23}$$

 $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} , σ_r はそれぞれ接線方向応力 (hoop stress), 軸 方向応力 (axial stress), 半径方向応力 (radial stress) である。 また, P_p は地層内の間隙圧力, P_w は坑内の泥水圧力, $\sigma^{\Delta T}$ は熱応力である。 θ は最大水平応力の方位からの角度を表 し,最大水平応力方位は0度,最小水平応力方位は90度 である。接線方向応力は0度および90度の方位でそれぞ



図6 推定した検層応答に基づくジオメカニカルモデル



Equivalent Mud Weight

図7 坑壁安定性評価の結果(マッドウィンドー)

れ最小値および最大値を取る。

$$\sigma_{\theta\theta}^{min} = \sigma_{\theta\theta}(0) = 3S_{hmin} - S_{Hmax} - P_p - P_w$$
(24)

$$\sigma_{\theta\theta}^{max} = \sigma_{\theta\theta} (90) = 3S_{H_{max}} - S_{h_{min}} - P_p - P_w$$
⁽²⁵⁾

また,最小水平応力方位に生じるせん断破壊は次式のモー ル・クーロン破壊規準で判定される。

$$\sigma_{\theta\theta}(0) = 3S_{h_{min}} - S_{H_{max}} - P_{p} - P_{w} + T_{0} \le 0$$
(26)

また,最小水平応力方位に生じるせん断破壊は次式のモー ル・クーロン破壊規準で判定される。

$$\tau \ge C + \mu \left(\sigma_n - \alpha P_p\right) \tag{27}$$

ただし、この時のせん断応力 τ および法線応力 σ_n を定めるモール円の両端応力には $\sigma_{\theta\theta}$ (90)および σ_n を使用する。傾斜井の場合には坑壁に作用する応力の記載が複雑になるが (Daneshy, 1973)、基本的な考えは変わらない。

4章に記載した岩石物理モデルに基づく密度,P波速度 およびS波速度を用いて構築したジオメカニカルモデルを 図6中に赤色の実線または破線にて示す。左から順に変形 係数(実線:ヤング率,破線:ポアソン比),強度定数(実線: 一軸圧縮強度,破線:内部摩擦角),応力(実線:最大水 平応力,破線:最小水平応力)に対応する。応力の表示に おいては,垂直応力を茶色実線,間隙圧力を薄青色実線で 重ねて示した。対象フィールドでは横ずれ断層系の応力場

石油技術協会誌 90 巻 2 号 (2025)

が想定され,垂直応力を中間主応力として推定した。この ジオメカニカルモデルに基づく坑壁安定性評価の結果を図 7 に示す。縦軸は深度,横軸は等価泥水比重に対応し,赤 色実線がブレークアウトを発生させない泥水比重の下限, 赤色点線が引っ張り破壊を発生させない泥水比重の上限を 表す。この評価結果は,先のワークフローに沿ってガスの 影響および薄層互層の影響を考慮した検層応答に基づくも のである。これらの地質要因による坑壁安定性評価への影 響について考察する。

5.1 ガスの影響

貯留層内の流体の種類によってP波速度は変化するが、 高浸透性の岩石の破壊現象において流体の影響は小さいよ うに思われる。つまりガスの影響を受けて低下したP波 速度データに経験式を適用して推定した岩石強度は、坑壁 破壊の可能性を過大に評価する可能性があると思われる。 このことを確認するため、ガスによる流体置換を実施せず 構築したジオメカニカルモデルとの比較を行った。図6中 に青色で示した実線および破線が水飽和の場合のジオメカ ニカルモデルに対応する。また、これを用いて実施した坑 壁安定性評価の結果すなわちマッドウィンドーを図7に重 ねた(青色の実線および破線)。まず、ブレークアウトを 起こさないための泥水比重であるが、ガスを考慮した場 合(赤色実線)との有意な差は認められなかった。ガスの 影響を考慮した場合、P波速度の低下により一軸圧縮強度 の推定値は低下するが、同時にヤング率も低下して応力が 小さく推定されるためと思われる。一方、泥水比重の上限 (引っ張り破壊を発生させないための泥水比重)は明確な 上昇を示した。ガスの影響を受けたP波速度を用いた場 合(赤色破線),最小水平応力が過小に評価されることで 泥水比重の上限値も過小評価される可能性がある。

5.2 互層の影響

上述のジオメカニカルモデルでは含泥岩率に応じた割合 の泥岩と砂岩によって形成される互層のP波速度から一 軸圧縮強度を推定した。この強度に基づいた場合,薄互層 中の弱部すなわち砂岩部分において選択的に破壊が起こる とすれば,坑壁崩壊のリスクを過小評価する可能性がある と考えられる。そこで,砂岩モデル(水飽和)のP波速 度から推定した一軸圧縮強度を用いて坑壁安定性評価を実 施した。この場合のブレークアウトを起こさないために必 要な泥水比重は,図7中に緑色実線で示すとおり,やや大 きい値を示した。その傾向は含泥岩率の大きい深度で大き い。これは、ヤング率の大きい薄層泥岩の割合が多くなる ほど応力も大きく推定され、破壊条件に近づくためと考え られる。なお、薄互層による坑壁破壊評価への影響は、坑 壁安定性評価よりも出砂評価の方が大きいかもしれない。

6. まとめ

本講演では、ジオメカニクスの検討における岩石物理モ デルの活用の有効性を示した。弾性波速度検層データはジ オメカニカルモデル構築において最も重要な情報を与える 一方で、その測定値はさまざまな地質要因に影響を受ける ことが知られている。そうした影響を考慮せず測定値をそ のまま利用してジオメカニカルモデルを構築すると、これ を用いたジオメカニクスの検討にも影響を及ぼす可能性が ある。本検討では傾斜薄互層を取り上げ、実フィールドの データに基づいて、圧密、含泥岩率、地層傾斜、ガス飽和 率などの地質要因が弾性波速度に与える影響について考察 した。その影響を定量評価するために岩石物理モデルを活 用し、弾性波速度検層によって得られる速度の値を推定し た。推定した速度に基づきジオメカニカルモデルを構築し て坑壁安定性評価を実施し、ジオメカニクスの検討が上記 の地質要因に影響される可能性があることを示した。

謝 辞

本講演に際し,三菱ガス化学株式会社および石油資源開 発株式会社には,実フィールドで取得された検層データの 使用および検討結果の公表について許可をいただいた。記 して感謝の意を表す。

参考文献

- Avseth, P., Mukerji, T., and Mavko, G., 2005: Quantitative Seismic Interpretation, Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511600074.
- Backus, G.E., 1962: Long-Wave Elastic Anisotropy Produced by Horizontal Layering. J. Geophys. Res., 67 (11), 4427– 4440. https://doi.org/10.1029/JZ067i011p04427.
- Chang, C., Zoback, M.D., and Khaksar, A., 2006: Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **51**, 223–237. https://doi.org/10.1016/ j.petrol.2006.01.003.
- Daneshy, A.A., 1973: A Study of Inclined Hydraulic Fractures. Society of Petroleum Engineers Journal, 13 (02), 61–68, SPE-4062-PA. https://doi.org/10.2118/4062-PA.
- Dvorkin, J., and Nur, A., 1996: Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets. *Geophysics*,

61, 1363-1370. https://doi.org/10.1190/1.1444059.

- Eaton, B.A., 1975: The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs. *Society of Petroleum Engineers of AIME*, Dallas, Texas, September 28-October 1, SPE-5544-MS. https://doi.org/10.2118/5544-MS.
- Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R., 1974: Formation velocity and density - the diagnostics basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, **39** (6), 770–780.
- Kirsch, G., 1898: Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Verlines Deutscher Ingenieure, 42, 797–807.
- Lal, M., 1999: Shale stability: drilling fluid interaction and shale strength. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 20-22, SPE-54356-MS. https://doi.org/10.2118/54356-MS.
- McNally, G.H.N., 1987: Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs. *Geoexploration*, 24, 381–395. https://doi.org/10.1016/0016-7142(87)90008-1.
- Puttiwongrak, A., Giao, P.H., and Vann, S., 2020: An Easily Used Mathematical Model of Porosity Change with Depth and Geologic Time in Deep Shale Compaction. *International Journal of GEOMATE*, **19** (73), 108–115. https://doi.org/10.21660/2020.73.39179.
- Rubey, W., and Hubbert, M.K., 1959: Role Of Fluid Pressure In Mechanics Of Overthrust Faulting, II: Overthrust Belt In Geosynclinal Area Of Western Wyoming In Light Of Fluid-Pressure Hypothesis. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **70**, 167–206. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1959)70[167:ROFPIM] 2.0.CO;2.
- Thomsen, L., 1986: Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, **51**, 1954–1966. https://doi.org/10.1190/1.1442051.
- Zoback, M.D., 2007: Reservoir Geomechanics, *Cambridge University Press*. https://doi.org/10.1017/ CBO9780511586477.

石油技術協会記事

- I. 理事会
- 第89期 第5回 理事会議事録
- 開催日時: 令和6年12月18日(木)15:30~18:00
- 開催場所:ハイブリット会議 (Microsoft Teams)
- 出 席 者:(敬称略)高橋会長,島本副会長,[理事]城戸 倉本,亀尾,国末,杉村,畠山,日野,福田 古井,船津,長縄,松島,村田,山本(晃),山田 吉岡,吉田 [監事]市川,樋口,横井,[委員長]小林(肇), 佐藤,荒木,永岡

[事務局]山口(合計 27 名)

- 議 題:
- 【確認事項】1. 第89期第4回理事会議事録(案)の確認
- 【審議事項】1. 会員の異動(令和6年10月1日~11月30日)
- 【審議事項】2. 秋季講演会開催の件
- 【審議事項】3. 第90回総会・令和7年度春季講演会について
- 【審議事項】4. 2025 年 第 90 巻会誌表紙ならびに刊行構成 の変更について
- 【審議事項】5. 懸案事項
- 【報告事項】1. 令和6年度10月次・11月次一般会計収支 報告
- 【報告事項】2. 各委員会の活動状況報告
- その他

次回: 令和7年2月20日(水) 15:30~ Web 開催

【確認事項】1. 第4回理事会議事録の確認

〈質疑なし、確認〉

【審議事項】1. 会員の異動(令和6年10月1日~11月 30日)

△和(左11日90日	名含会員	特別会員	止会貝	学生会員	貧助会員	台	計 COF
(育和 b 年 11 月 30 日)	12	179	1,168	125	61	1,	605

【審議事項】2. 秋季講演会開催の件

〈11月12日に東大小柴ホールにて「低炭素エネルギーシステムの社会実装に向けて~水素・アンモニア~」のテーマで開催。参加申込者数108名(会場参加者:45名,オンライン参加者:最大54名,後日オンデマンド申込1名。アンケート結果について報告し、承認〉

【審議事項】3. 第90回総会・令和7年度春季講演会について

〈11/29 新潟で第2回準備委員会開催。大会日程: R7.6/10 第90回定期総会,特別講演,懇親会。6/11-12春 季講演会,6/13 見学会。会場:朱鷺メッセ3,4階に集約。 見学会:施設見学2コース,地質巡検1コース。ネットワー キング:大会2~3日目(春季講演会)の3~4階ホワイ エにてコーヒー提供。6/11夕方4階マリンホールホワイ エでアイスブレーキング実施。費用:地方分担金,企業ブー ス出展企業でスポンサーシップに賛同企業からの支援によ り捻出,グッズや酒などの提供も受付。提供場所に賛同・ 協力企業のロゴを表示し,要旨集への企業広告を掲載。Q: 日本地下水学会は生産技術委員会の個人講演の一部に参加 意向。講演数の多い生産の個人講演に加えることは可能か 否かは委員長欠席のため継続協議。Q:承知。大会会告(概 要版)として早期に周知する旨,承認〉

【審議事項】4. 2025 年 第 90 巻表紙ならびに刊行構成変 更について

〈<u>第90巻会誌表紙</u>:探鉱技術委員会から素材提供を受け、複数の表紙案から編集委員会にて投票し、資料提示の案となった。これを来年度の会誌表紙(案)を説明し、承認〉

会誌刊行構成の変更:作井技術委員会の不公平感は未解 消のため継続協議とするが今回は取下げる旨説明し,承認〉

【審議事項】5. 懸案事項

〈<u>事務局体制の見直し</u>:事務業務委託費および今後事務 所管理費の上昇および今後の人員体制の変化について説 明,事務所体制の再構築について承認。また事務所移転の 検討開始について了承

<u>法人化検討</u>:法人化の Pros・Cons を取り纏めた。これ を踏まえ以下の内容に集約:「法人化手続きは多大な労力 と時間を要する割にメリットは大きくない,一方,法人契 約が可能となるメリットは大きく,運営上のガバナンス 強化につながる。会員の理解を得ながら,コンプライアン ス上のリスクを払拭するために法人化検討を進めたい」と 集約

日本地球惑星科学連合 2025 年大会 学協会セッション: 昨年度の実績に伴いオーラル枠 3 コマが仮配分。2025 年 5 月 25 ~ 30 日開催,幕張メッセにて開催

<u>天然水素ワークショップ:</u>2025 年 2 月 14 日,東大 HASEKOH-KUMA HALL にて開催が決定。大会当日の人員 手当についての依頼を受け,事務局および幹事等で対応す る旨回答

<u>90 周年記念事業ワーキングチーム</u>:分担について固ま り,正式依頼を近々出す

会費納入に係る後押しのお願い:11月に督促を発信し, 幹事より後押しを依頼済み。後押しできていない所属に対 し理事の後押しを依頼

協会賞選考委員について:理事から委員長,副委員長2 名の選出を打診。その場での立候補者がいなかったため後 日個別依頼とする旨,了承〉 【報告事項】1. 令和6年度10月次・11月次一般会計収支 報告

〈質疑なく。承認〉

【報告事項】2. 各委員会の活動状況報告

- ・ <u>編集委員会:</u>(小林委員長)第89巻6号を12月11日
 に発刊。また90巻1号は1月下旬を,また2号は3
 月下旬を目標に進めている。第90巻の表紙については編集委員会で選考実施。
- ・ 探鉱技術委員会:(佐藤委員長)11月25日第4回探 鉱技術委員会内容について報告。令和7年度春季講演 会のテーマ:事務局提案「ダイバーシティ〜次世代ジ オサイエンティストを惹きつける領域の多様化」を提 示。特別見学会(地質編)実施後アンケートを基にルー トの一部見直し中。特別見学会(物理探査編)2月26 日実施予定。
- ・ <u>作井技術委員会:</u>(北村委員長代理,運営幹事永岡氏より報告)11月11日開催の第3回作井技術委員会について報告。令和7年度春季講演会シンポジウム:
 CCS 委員会との共催を視野に"掘削技術の伝承(新たに取り組むべき技術課題(CCS/デジタル等含む),
 人材育成)"のテーマイメージで事務局案を作成。
- ・ <u>生産技術委員会:</u>(村上委員長の代理として運営幹事 荒木氏より報告) 12月6日の第5回生産技術委員会 を秋田大で開催。春季講演会テーマは各社からアイデ アを募り、①既存E&P開発を各社講演形式で発表,
 ②人材関係テーマに小セッション形式,各15分程度 で発表、③小セッション内でパネルディスカッション, 座談会を実施との方向性が出された。
- CCS 委員会:(長縄委員長)11月28日第3回運営幹 事会について報告。春季講演会のシンポジウムについ て作井技術委員会との共催で開催する。委員の出入り が多いため委員会名簿の最新版を確認。
- HSE 委員会:(吉田委員長)11月5日に第3階HSE 委員会を開催。2024年度HSE講和(案)「CCS事業 における環境社会側面(仮題)」承認。HSE教育訓練 分科会の進捗を報告。
- ・ <u>国際委員会</u>: (山本委員長) 12 月 19 日 JFES Chapter Meeting をオンライン開催(講演2本)予定。SPE/ JPAT 共催 Workshop「CCUS and Low Carbon Fuels」の 開催場所と日程(令和7年3月11-12日)確定。2024-25 SPE Distinguished Lecture 第1回, 1月10日開催予 定。JAPT 主催, JOGMEC・NEDO 共催 天然水素ワー クショップ, 2月14日午後,東大 HASEKOH-KUMA HALL 開催予定。

・ <u>HP 委員会:</u>(島本委員長)第89巻6号掲載,令和7 年度春季講演会個人講演申込受付と講演要旨の発行に ついて掲載。関連学会の会告掲載・他団体企業からの リンク依頼について3件掲載。

 ・ <u>資源経済委員会:</u>(岩間委員長)(報告事項なし)

 その他

 SPE/JAPT 共催 CCUS and Low Carbon Fuels に関する Workshop に向けた準備作業の進捗状況について 島本副会長より報告。

以上

II. 幹事会

第89期第10回

開催日時:令和7年1月16日(木) 15:30~17:50

- 開催場所:ハイブリット会議 (Microsoft Teams)
- 出欠状況:会長,副会長:高橋・島本・吉良 (敬称略)編集委員長:小林 幹事:市江,石下,今野,後藤,高原,知識,草宮 近藤(記),内山,藤田,事務局:山口

議 題

- 議題1. 第89期第9回幹事会議事録の確認
- 議題 2. 会員の異動(令和 6 年 12 月 1 日~ 12 月 31 日)
- 議題 3. 令和 6 年度 12 月次一般会計収支報告

議題 4. 第 90 回総会・令和 7 年度春季講演会 その他

第89期第11回

- 開催日時:令和7年度2月13日(木) 15:30~17:05
- 開催場所:ハイブリット会議 (Microsoft Teams)
- 出欠状況:会長,副会長:高橋,島本,吉良 (敬称略)副編集委員長:小林 幹事:市江,石下,今井,内山,今野,後藤 近藤,草宮,知識,藤田,事務局:山口(記)
- 議 題
- 議題1. 第89期第10回幹事会議事録の確認
- 議題2. 会員の異動(令和7年1月1日~1月31日)
- 議題3. 令和7年1月次一般会計収支報告および年度末 見込
- 議題 4-1. 第 90 回総会・令和 7 年度春季講演会
 - **42.** 春季講演会要旨集(過去分)の協会 HP での開示, 他について
- 議題 5. 令和 7 年度 会議・行事開催予定(案) その他:

以上

秋田県天然瓦斯輸送㈱ 伊勢化学工業㈱ 伊藤忠テクノソリューションズ(株) (株) INPEX ドリリング ENEOS Xplora (株) (株)オフショア・オペレーション (株)クリステンセン・マイカイ コスモエネルギー開発(株) サイスガジェット(株) (株)ジオシス シュルンベルジェ(株) 石油資源開発㈱ ㈱達磨鉄工 (株)テルナイト (株)東邦アーステック 日宝化学(株) 日本海洋石油資源開発㈱ 日本マントル・クエスト(株) (株)ピージーエス・ジャパン (株)ベッツ 三菱ガス化学㈱

【石油技術協会 賛助会員リスト】

AGC (株) 出光興産(株) (株) INPEX エスケイエンジニアリング(株) エネルギー資源開発連盟 関東天然瓦斯開発㈱ (株)合同資源 コスモス商事(株) サハリン石油ガス開発(株) JFE スチール(株) シュルンベルジェ(株) 長岡支店 第一実業㈱ (株)地球科学総合研究所 電源開発㈱ 日揮ホールデングス(株) 日本オイルエンジニアリング(株) 日本 CCS 調査(株) ハリバートン・オーバーシィーズ・リミテッド (株)バルカー 深田サルベージ建設(株) 三井海洋開発(株)

アブダビ石油(株) 伊藤忠石油開発㈱ (株) INPEX エンジニアリング (独)エネルギー・金属鉱物資源機構 (株)オーシャン・ジオフロンティア 極東貿易(株) 合同石油開発㈱ コンピューター・モデリング・グループ・リミテッド サミットエネルギー開発(株) JX 金属探開㈱ (株)昌新 大成建設(株) 千代田化工建設㈱ 天然ガス鉱業会 日鉄エンジニアリング(株) 日本海洋掘削(株) 日本製鉄(株) (株物理計測コンサルタント 三井エネルギー資源開発(株)

(令和7年3月現在)

石油技術協会 会議・行事開催予定

会 議	開催日	開催会場(予定)	備考
理事会	$15:30 \sim 17:00$		
第1回	令和7年4月17日(木)		
第 2 回	令和7年6月19日(木)		
第3回	令和7年8月21日(木)	ハイブリットを基本とする	
第4回	令和7年10月16日(木)		
第5回	令和7年12月17日(水)		
第6回	令和8年2月19日(木)		
幹事会	$15:30 \sim 17:00$		
第1回	令和7年4月10日(木)		
第2回	令和7年5月15日(木)		
第3回	令和7年6月5日(木)		
第4回	令和7年7月10日(木)		
第5回	令和7年8月7日(木)		
第6回	令和7年9月11日(木)	ハイブリットを甘木とする	
第7回	令和7年10月9日(木)	//1/リットを基本とする	
第8回	令和7年11月12日(水)		
第9回	令和7年12月10日(水)		
第10回	令和 8 年 1 月 14 日 (水)		
第11回	令和 8 年 2 月 12 日 (木)		
第12回	令和 8 年 3 月 11 日 (水)		
評議員会			
	(未定)		
行事	開催日	会場	
第90回定時総会		- 新祖古生發ノッセイ階	
特別講演会	令和7年6月10日(火)	利荷山木鳥ハツヒ4陌	
懇親会	-	ホテル日航新潟 30 階	
春季講演会	令和7年6月11日(水),12日(木)	新潟市朱鷺メッセ3~4階	
		地質巡検1コース.	
見学会	令和 7 年 6 月 13(金)	施設目受会クラーフ	
利禾港淀合	▲和7年11日上年	市古十份小此十一川	
秋学神視云			
符別見字会(地質編)	令和7年9月上旬	十葉県戊原帀, いすみ帀, 長生村	
特別見学会(物探編)	令和 8 年 2 月下旬	オンライン開催	

関係学協会·団体 行事開催予定

No.	学協会・団体名	行事名	期 日・会 場	備考
1				
2				

坑井掘削状況

特記事項なし

自:令和7年1月1日 至:令和7年2月28日

編集後記

編集委員の石川と申します。昨年4月に出向先の JOGMECから出向元の出光へ復帰し、その後に編集委員 を拝命して早1年が経過しようとしております。出光へ の復帰後は、40代技術者を待っていましたのごとく石油・ CCS・地熱の各技術関連の業務で忙しく、編集委員会への 出席率は低く、編集後記の担当も後回しにと配慮して頂き 現在に至ります。ここでは、出向を通して感じた企業の風 土・文化の違いに関し、思うことを少々記述してみたいと 思います。

JOGMEC には合計3年間お世話になりました。幕張に ある技術センターに勤務しておりましたが、企業カラーと いうものが実在することを身を持って知りました。出向以 前には、ノルウェーとベトナムの2つの海外事務所への駐 在経験がありましたが、現地の文化や環境などに基づく事 務所間の雰囲気の違いはあるものの、同じ出光として風土 は同等で違和感ありませんでした。

一方で、JOGMEC は行政機関であることもあり、風土 が異なるように感じました。JOGMEC の財源が"税金" であることは周知の事実ですが、まず驚いたことは、働い ている職員の皆さんに、大なり小なり"税金"を使用して いるという意識が根付いているように感じられたことでし た。そして、税金の使用にあたっては、二重三重の確認を 行うので、どうしても必要プロセスに手間と時間がかかる ことが理解でき、自身の業務を進めるのに発生する手続き・ 申請に対しても慣れるのに少々苦労したことを覚えていま す。民間会社が自分達の活動により得た資金を企業活動に 使用する意識とは異なる意識で資金を扱っているように感 じました。

次に、金融支援と技術支援の両面において、日本企業へ の貢献という観点を重要視していることは、JOGMECの 行動指針を確認すれば理解されることではあるものの個人 的な発見でした。出向中に関わった海外研究機関との共同 研究立ち上げの案件では、国内企業への具体的な貢献の道 筋を描けるかが判断のポイントであり、結果的に立ち上げ には至らなかったものの出光との違いを知るのに役立ちま した。その他に、業界の全民間企業への連絡・アクセスが 容易であることや、国内の大学や海外の研究機関・NOC と連絡体制が構築できていることも民間企業とは異なる美 点と感じました。JOGMEC には、国内企業を上手く連携 させたり、民間企業が実施する事業への金融と技術の支援 を引き続き実施して頂けたらと思います。

以上, JOGMEC さんの紹介みたいな内容になりましたが, 出向は企業の風土・文化の違いを知るよい機会となったことの一例を共有し, 編集後記とさせて頂きます。

(会誌編集委員会委員 石川 和明) 現在の編集状況:受理12編,委員長預かり1編,継続 審議3編,新規受付4編

次号予告(第90巻第3号)

<論 文>

東柏崎ガス田における CCUS 貯留層モデルの最適化に向けた火山岩貯留岩	のロックタイ	ピング		
上野	健太・江川	浩輔・小島	啓太郎・松开	艮一
<講 演> 水素を巡る最近の動きについて~水素社会推進法~			廣田	大輔

令和7年度春季講演会講演要旨

石油技術協会会誌編集委員会

		委	き 員 長	小林 肇(東京大学)			
		畐	委員長	石瀬 康浩(INPEX)			
		追	國幹事	岡野 祥之(石油資源開発)			
芦田	彬久	(INPEX)	橋本	直明 (三井石油開発)	松渕	仁	(INPEX)
				運営委員			
安達	陽介	(石油資源開発)	石川	正紀 (INPEX)	石崎	理	(石油資源開発)
堀内	侑樹	(INPEX)	松井	良一 (INPEX)	渡部	哲子	(石油資源開発)
				委員			
青木	直史	(石油資源開発)	阿部	一徳 (秋田大学)	石川	和明	(出光興産)
岩本	広志		大内	久尚 (早稲田大学)	大槻	敏	(JOGMEC)
栗田	裕司	(新潟大学)	三瓶	良和 (島根大学)	谷	和幸	(JX 石油開発)
玉置真	〔知子	(日本オイルエンジニアリング)	長縄	成実 (秋田大学)	新堀	雄一	(東北大学)
荷福	洸	(INPEX)	野中	美雪(石油資源開発)	長谷川	智紀	(石油資源開発)
福田	真人	(JOGMEC)	風呂日	1郷史(産業技術総合研究所)	山本	正伸	(北海道大学)
山﨑	誠	(秋田大学)	吉岡	秀佳(産業技術総合研究所)			
				事務幹事 山口 明			

 ©The Japanese Association for Petroleum Technology 2025
 Keidanren-kaikan 17F, 3-2, Ohtemachi 1- chome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan PHONE 03-3214-1701 FAX 03-3214-1703
 HOME PAGE https://www.japt.org/
 石油技術協会誌 (JAPT) Vol.90, No.2
 2025 年 3 月発行 会員頒布
 編集兼発行者:石油技術協会 発行者所在地:〒100-0004 東京都千代田区大手町 1-3-2 経団連会館 17 階 (エネルギー資源開発連盟内)
 電話 03-3214-1701 ファックス 03-3214-1703 振替口座 00120-8-63168 ホームページ https://www.japt.org/ E-mail office@japt.org
 印 刷 所:〒121-0072 東京都足立区保塚町 8-20 ㈱大和印刷 表紙デザイン 電話 03-5831-0051 ファックス 03-5831-0052



The Japanese Association for Petroleum Technology