

東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター

目次

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. 巻頭言 2. 国際シンポジウム「アラブ首長国連邦と日本とのエネルギー分野における学術交流の架け橋」開催報告 3. FR CERシンポジウム「レアアースのすべてを語る
ー 海底レアアース泥の探査・開発から削減技術、製錬、リサイクルまで ー」開催報告 | <ul style="list-style-type: none"> 4. 基礎講座「レアアース」 5. アブダビ石油大学との協定締結 6. トピックス <ul style="list-style-type: none"> (1) JX日鉱日石開発株式会社寄付講座の開設について (2) JOGMECとの共同研究紹介 (3) 受賞 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

1. 巻頭言



センター長 佐藤 光三 教授

資源ピラミッドの下位に位置づけられていた非在来型資源であるシェールガスの開発、それが近年可能となり、所謂シェールガス革命が米国で起こりました。その影響は米国内に留まらず国際的な広がりをみせており、各国はエネルギー戦略の見直しを始めています。しかし革命の影響ばかりが

耳目を集め、革命の実体が十分に理解されているかは疑問です。恰も革命は既に成就し、今後もシェールガスの生産が安定的であるかに伝えられ、これを前提に議論が進むとすれば不安を感じざるを得ません。

シェールガス革命は技術改革の賜物と喧伝されています。中でも重要な技術として水圧破碎(フラック)と水平坑井が取り上げられますが、同時に、これらは実用化されて久しい既存技術であることも広く知られるようになりました。実際、水圧破碎の適用は1947年に遡り、現在では世界で数百万件の実績があります。水平坑井は、1970年代には実用化され、現在数万件の実績があります。シェール層についても、そこに炭化水素資源が豊富に胚胎していることは周知の事実でした。ここで素朴な疑問が浮かびます。大きな資源量が見込まれ、採集のための基盤技術も存在していたのに、何故メジャー等の主要プレイヤーは最近まで本格的な開発に乗り出さなかったのか。その答えは明解です。従来の解析においては、シェール層の生産性は余りにも低く、特殊な採集法を用いても経済性を満足するまでの改善は見込めないと評価されていたのです。在来型貯留層の孔隙径がマイクロオーダーであるのに対し、シェール層のそれはナノオーダーです。浸透率に換算すると、シェール層の生産性を在来型のレベルまでに引き上げるには、 $10^4 \sim 10^6$ 倍の改善が必要と

なります。水平坑井と多段階の水圧破碎を組み合わせ、考えられる最大限の効果があっても改善度は 10^3 倍程度と計算されます。シェールガス開発は、生産性の改善に限界があると判断され見送られて来たのです。

それでは何故、開発が可能となったのでしょうか。現在開発中のフィールドにおいて生産性を飛躍的に向上させた、従来の解析では考慮されなかった要因とは何でしょうか。これも次第に明らかになりつつあります。その一つはクヌーセン流です。孔隙径の小ささは一般に低浸透率につながりますが、これは連続体の仮定が成り立つ範囲でのことです。ナノオーダーの小さな孔隙における流れは、流体を構成する分子としての振る舞いの影響を強く受けるようになります。滑りや拡散の効果が大きくなり、見掛けの浸透率が大きくなることが知られています。他の要因としては、フラクチャーが複雑に形成され、これまで考えられていた平板形状と比較して影響範囲がより立体的に広がっているということが挙げられます。シェール層の状況によってはこれらの要因が生産性に対しプラスに働き、改善度がさらに100倍程度になることが見込まれます。

しかし、上記の計算は好条件が重なった場合に成り立つものです。未だ生産性の飛躍的な改善へのメカニズムの解明は途上にありますし、当然、これを操作する技術を開発・確立する段階にはありません。そもそも、こうした好条件が重なるフィールドばかりとは考え難いのです。即ち、冷静に見ればシェールガスは未だ安定した開発が保証される段階にはなく、マージナルな資源と捉えるべきでしょう。革命的なエネルギー転換や資源開発を完遂するまでには、幸運と熱意と同時に、これらを支える的確な判断・解析による技術開発が不可欠です。当センターもフロンティアエネルギー・資源であるメタンハイドレートやレアアース泥の開発に関与していますが、必ずしも「ある=(採算が合い)開発可能」ではないことを肝に銘じつつ、技術改革による早期実現をめざし前向きに取り組んでいく所存です。

2. 国際シンポジウム「アラブ首長国連邦と日本とのエネルギー分野における学術交流の架け橋」開催報告

「アラブ首長国連邦と日本とのエネルギー分野における学術交流の架け橋」と題する国際シンポジウムを平成23年12月5日(月)東京大学武田ホールにて開催しました。本シンポジウムの目的は、広く国内外の関係者を集め、両国の学術的国際的協調により期待される効果を発見・共有することにより、日本における今後のエネルギー政策、学術研究発展、高等教育のあり方の視点から期待される効果や、人材育成や事業の国際展開の視点から期待される効果などを広く国内外で共有する機会としました。また、昨今急速な成長を遂げている中東地域諸国がメディアで紹介されることも多く、産油国における研究・教育に関する取り組みに関しても、広く周知する機会とすることも意図しました。

主催はアブダビ石油大学(PI: The Petroleum Institute, Abu Dhabi)、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、東京大学です。東京大学には、学内にエネルギー関連の研究・教育を実施する3研究センターがあり、日頃から密な協調関係にあります。それぞれエネルギー・資源フロンティアセンター(FRCER:石油工学・石油地球科学系)、エネルギー工学連携研究センター(CEE:機械工学・化学工学系)、先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET:電気工学系)であり、分野的にアブダビ石油大学の学科構成とほぼ合致します。さらに、人文社会系である東京大学中東地域研究センター(2011年4月設立)を主催側として迎えることにより、東京大学が有する総合力を生かして、シンポジウムに持たせるように努めました。また、駐日アラブ首長国連邦大使館の協賛も得ました。

午前中は、東京大学大学院の北森武彦工学系研究科長による会



写真1 北森 武彦 工学系研究科長

挨拶の後(写真1)、基調講演1件と招待講演3件を実施しました。まず、「アブダビ石油大学における研究ならびに教育の国際協調の現状」と題し、アブダビ石油大学副学長・工学部長のYoussef Abdel-Magid教授が基調講演を行い(写真2)、アブダビ石油大学の概要、教育プログラムの特徴、インターンシップ、国際連携などが紹介されました。



写真2 アブダビ石油大学 Youssef Abdel-Magid 副学長・工学部長

アブダビ石油大学は、設立してから10年程度という若い大学ですが、アブダビ国営石油/ADNOCを中心として有力石油会社(Royal Dutch Shell, BP, Total S.A, ジャパン石油開発(株))や世界の有力大学と連携することにより、急速な成長を続けています。とりわけ研究能力の観点からは、国際的な学術誌での掲載数が年々増加し、教員一人当たりの論文出版数はUAE内では最良であり、アブダビ国営石油(ADNOC)の傘下の研究機能を担う組織として位置づけられていることが紹介されました。教育プログラムでは、英語で行われる大学講義に備えて、英語や化学・物理・数学・コンピュータ等の基盤学問を1年間かけて習得させるプログラムを採用しており、各講義の参加学生を20名以下と制限して授業効果を向上しているとのこと。現在、化学工学・電気工学・機械工学・石油工学・石油地球科学の5つの学部で構成されていますが、新規に物質科学・工学の新設も進行中との紹介もありました。

女性教員の割合が多く、男子学生と女子学生は別棟で教育されています。特に、女子学生を対象にWISE(Women In Science and Engineering)と呼ばれるプログラムを運用し、女性が確固たる地位を科学分野さらには社会において確保していけるよう質の高い教育が施されていて、実際に海外の大学院に進学する優秀な

女子学生も多数いるとのこと。さらに、ADNOC職員や教員へも充実した継続教育を行っており、日本の企業では横河電機(株)やコスモ石油(株)とも共同プログラムも行っているようです。いくつかの研究センター棟の建設を段階的に進めており(すでに竣工済みもあり)、モジュール化されたラボラトリと一貫したサポート体制により、高度で先端的な研究を推進する環境を整備しているとの紹介がありました。

夏休み期間中8週間のインターンシップ参加が学部学生に義務づけられており、主として石油・天然ガス開発・生産現場で就業体験するとのこと。また、協賛会社や協定大学で実施する場合もあり、東京大学と協定が締結すれば、東京大学へも学生を派遣したいとのことでした。世界各国で多彩なインターンシップを行っている写真の多数紹介がありました。海外大学との研究連携では、コロラド鉱山大学、ミネソタ大学、メリーランド大学、ライス大学、スタンフォード大学、テキサス大学オースティン校などの多様な共同プロジェクトの紹介もあり、魅力的な教育・研究環境を有していることが良く伝わりました。

続いて、招待講演の1件目として、東京大学中東地域研究センターの森まり子特任准教授が「湾岸と日本—学術交流の意義—」と題して講演しました(写真3)。



写真3 東京大学中東地域研究センター 森 まり子 特任准教授

東京大学中東地域研究センター(UTCMES)は、オマーン・スルターン国政府の寄付金により、2011年4月に設立された研究センターです。日本にとって重要な湾岸諸国をはじめとするアラブ世界を中心として、急激な変化を遂げつつある21世紀の中東地域への理解を深め、学術・文化交流を通じて中東地域との友好関係を促進することが目的の一つのセンターです。国際的な視野に立った質の高い中東研究の対外的発信や中東地域との学術交流を図っていくことを目標に活動し、また将来的には公平な視点で中東を理解し、この地域を政治的に不安定にしている紛争の解決や平和構築に貢献できるような若い世代を育てることにより、第一線の研究を教育

にも還元することを目指しているとの紹介がありました。現在オマーンのスルタン・カブース大学との学術交流を構想しており、今回の講演ではケーススタディーの一つとして、中東地域研究センターのご活動および将来的な構想について話がありました。

まず、地域研究を推進する総合文化研究科傘下のグローバル地域研究機構には、アメリカ太平洋地域研究センター、ドイツ・ヨーロッパ研究センター、持続的平和研究センター、持続的開発研究センター、アフリカ地域研究センター、アジア地域研究センター、中東地域研究センターの7つのセンターがあり、7センターの連携によって、特殊性と普遍性——どこまである地域固有の現象でどこから先が普遍的な現象なのか——などを共同で明らかにすることを可能にしているとの紹介がありました。

初年度の平成23年度は、研究・教育基盤の整備に多くの時間を費やしているが、今後は、国際シンポジウムやセミナーなどを開催し、グローバル化と民主化、イスラーム的価値観と多元主義、日本の長期的な国益を見据えた対中東外交のあり方など、激動の中東情勢をめぐる切実な問題を、内外の政治家・外交官・ジャーナリスト・学者を招き巨視的かつ長期的な視野から議論することを予定しているとのことでした。また近い将来には、グローバル地域研究機構の傘下にある他のセンターや、学外の主要な学術機関とも連携して、駒場キャンパスの伝統である「学際的な魅力」にあふれた学術的企画を構想していきたいとの話もありました。さらに、来年度は月に2回程度のペースで、中東関連の講演会・セミナーを駒場で開くことを計画中とのことで、自由に発言しつつ将来に向けて刺激を受けられる環境を提供することにより、学問を象牙の塔にせず常に一般社会との現実的ななかかわりの中で自己検証していくことの紹介がありました。その他にも、様々な活動の紹介がありました。

湾岸と日本の学術交流の意義について、学術・文化・観光やモノの交流などのソフト面での関係強化が相互の理解と友好的な感情を促進し、日本の経済的な安全保障に結局は貢献するとの指摘がありました。さらに、若い世代の柔軟な知性を刺激し、世界的な視野を持たせるような文系理系の枠組みを超えた学内提携や共同作業(理系・文系両方の研究科やセンターの提携など)の重要性が強調されました。アブダビ石油大学と将来的な提携をめざす東京大学エネルギー関連3センターと学術交流上の共通する課題があると共に、中東地域を良く理解し豊富な交流経験に基づく方法論は、当該地域との連携経験が少ないエネルギー関連3センターだけでなく、これから中東地域と学術交流を考えている大学にとりましても大変有益な情報が提供されました。

続いて、ジャパン石油開発株式会社代表取締役社長喜田勝治郎氏より「アブダビとの重層的関係」と題した招待講演が行われました(写真4)。



写真4 ジャパン石油開発株式会社
喜田 勝治郎 代表取締役社長

ジャパン石油開発(株)は40年の長きにわたり(1973年にアブダビにて油田鉱区権益を取得)、アラブ首長国連邦において事業・社会貢献活動を実施し積み重ねられてきた歴史や経験の紹介が行われました。前述のように、ジャパン石油開発(株)はアブダビ石油大学に資金支援している石油会社の一つでもあり、アブダビ石油大学への教育的支援経験もあります。会社の歴史的経緯、概要、アブダビでの操業活動、アブダビとの協調関係、石油開発会社から見たアブダビから日本への期待についての紹介がありました。まず、アブダビの経済成長のポテンシャルの大きさについて触れ、世界でも豊かな国の一つになっており、日本の企業にとってのビジネスチャンスになり得ること、また多面的な関係あるいは絆を深めることができる国柄同士であることが述べられました。歴史的には、日本とアブダビとの関係の中心は石油・天然ガスであるが、今後は多様な可能性があることが示唆されました。ジャパン石油開発(株)がアブダビとの協調関係を築く礎となったのは、Upper Zakum油田(東京湾と同規模スケールである巨大油田)での石油開発において、開発困難を理由に他外国企業が撤退する中で、アブダビと日本との協力により成功を成し遂げた経緯があり、またビジネスのみならず両国にとって有益になるような活動にも取り組んできたとの紹介がありました。アブダビ政府からの要請もあり、教育・環境の面での関係を作ってきたとの紹介がありました。

また、前述のようにアブダビ石油大学設立に際して資金的・教育的な援助を行っており、とりわけ、日本の先端技術に関してアブダビ石油大学より講義要請があり、人工衛星を利用したリモートセンシング技術に関する短期間講座を開催し、湾岸一帯における環境変化の分析を行うことによる環境モニタリングに関するスキル向上に

貢献しているとの紹介がありました。さらに、1993年以来、アブダビ石油(株)と共同でアブダビ石油大学とUAE大学からの学生をインターンとして夏季の3週間程度受け入れているとのこと。すでにインターンシップ修了生は100名以上に及んでおり、多くが石油会社に勤務しているとのこと。日本を良く理解した上で友好交流関係を築いておくことは、10年後20年後に仕事上の協力を繋がるのが期待できます。また、1988年には公文式の算数教育を紹介し、現在ではUAEで公文式の教育サービスが展開されるに至っているとのこと。

環境面では、マングローブの植林プロジェクトに関する技術移転、珊瑚礁の再生などの支援をしてきているとのこと。文化面でも日本の茶道や鷹狩りを紹介する等の貢献をされてきました。また、UAEが主催する世界エネルギーサミット「World Future Energy Summit」での再生可能エネルギーに関する技術展示にも参加してきたとのこと。

最後に、ジャパン石油開発(株)が日頃UAEでビジネスを行っている立場から見た、UAEサイドからの日本への期待について、次のようにご指摘をいただきました。

- (1)石油・天然ガスの生産、販売のみではなく、これらの製品に付加価値を付けること(例えば石油化学技術の応用)
- (2)様々な技術移転を通じてUAEでの就業機会を増やすこと
- (3)再生可能エネルギー開発、環境技術の促進など

このように多岐にわたるUAEからの期待に対して、日本の石油開発会社だけでカバーできる範囲は限られていることから、アブダビ・日本経済協議会というフレームワークが作られ、第1回の会合が近々開かれるとのこと。そのような場で、長期的な視点で石油・天然ガスを超えた、より広汎な相互依存関係を上手くバランスさせていくことが重要であると述べられました。また、ハード面でのインフラばかりでなく、ソフト面でのインフラの整備もUAEでは重要な視点になってくることのご指摘もありました。

招待講演の最後に、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 国際資源開発人材育成プロジェクトディレクターの奥村直士氏が「エネルギー技術分野における人材開発の持続的な協力関係」と題し、講演しました(写真5)。



写真5 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構 国際資源開発
人材育成プロジェクト 奥村 直士 プロジェクトディレクター

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構は国際資源開発人材育成プロジェクト事業を推進する組織で、エネルギー産業を取り巻く状況など、人材育成という観点から当該事業の背景を含めて事業のあるべき方向について話がありました。昨今、エネルギー産業全体において、有能な技術者不足が生じている原因として、

- (1)過去15年間において、新規雇用を最小限に留めると共に、従業員の早期退職も推奨してきたこと
- (2)新規プロジェクトの減少に伴い、技術者が現場業務から離れ、モデリングやシミュレーション等のオフィス業務に従事してきたこと
- (3)様々なパイオニアワークを担った熟練技術者が、大量に定年退職の時期を迎えつつあること
- (4)産業界のニーズと大学のシーズとの間にズレが生じ、産業界は即戦力を、大学から得ることが困難となってきたこと

の4点をご指摘されました。とりわけ、2010年のメキシコ湾原油流出事故の発生原因として、パイオニアワークの技術・経験伝承不足が関係している可能性が指摘され、現場力ある人材育成制度の再構築が世界的に求められていることが強調されました。

次に、日本への一次エネルギー供給ならびに消費構造と日本が優位性を有するエネルギー関連技術に関する包括的レビューが行われました。具体的には、石油精製における超々深度脱硫技術、LNGを用いたコンバインドサイクルや石炭ガス化複合による高効率発電、低炭素・省エネ技術やそれを促進する各種対策(トップランナー制度など)など、日本が先導している技術や対策の網羅的な紹介がありました。また、エネルギー供給の信頼性を高めるには、設備建設・運転操業に必要な高度で安定したオペレータ技術と、これを支える高信頼性機器・設備を製造する高度なメーカ技術双方の基盤を支えていく人材育成の重要性が強調されました。さらに、エネルギー産業の技術を維持・発展させるための、産業界と大学の連携

の場として、

- (1)我が国では、産学官が参加する学会と技術者協会とが、人材育成の産学連携に大きな役割を果たしてきたこと
- (2)昨今産業教育は社会人教育として通常の大学教育から切り離されてきたが、産業人を対象とした専門職大学院が大学に設立される場合があること
- (3)人材不足の産業界では、時間を掛けて丁寧に新人教育を行う余裕が無くなってきていること

の3点を指摘されました。

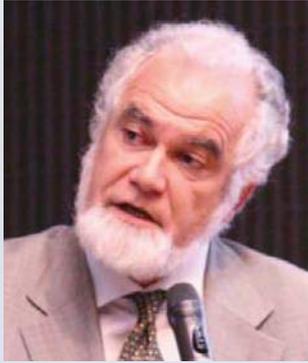
次に、教育と人材育成における国際協力について、グローバルな視野を持った専門能力を育成することの重要性が指摘され、エネルギー産業人材の国際供給が加速しつつある現状において、以下の目標を目指す必要性が指摘されました。

- (1)IT活用による大学教育のグローバル化を推進すること
- (2)広範囲な一般産業界が保有する最先端の産業技術を、国境を越えてエネルギー産業に積極的にバランス良く持ち込むこと
- (3)グローバルに広がるエネルギーサプライチェーンと設備を最適化すること。また、グローバルエネルギーサプライシステムを、エネルギー市場や近傍のエネルギーインフラに整合させること
- (4)グローバルなエネルギー効率を向上させ、グローバルな環境負荷を最小化させること
- (5)ハードパワーとソフトパワーを備えたスマートパワーを強化し、グローバルに事故発生を予防すること
- (6)グローバル化したサプライチェーンの各要素にエネルギーを安定供給することで、サプライチェーンの高信頼性を実現すること

最後に、UAEと日本の大学連携のあり方については、大学協定締結をめざし、その下での共同研究、単位互換、相互インターンシップ、ITを用いた遠隔講義(UAEと日本の時差は5時間)等の可能性があることを示唆されました。

シンポジウムの午後には、「石油とエネルギー関連技術」に関する講演として、アブダビ石油大学から3件、東京大学から3件の技術的発表があり、両大学におけるエネルギー関連技術に関する研究トピックの紹介がありました。次項では講演タイトルとお写真を掲載いたします。

【アブダビ石油大学側講演1】
The Role of Geo-Sciences in Field Development Planning



Dr. Jorge Salgado Gomes, PARTEX
Chair Professor of the Department of Petroleum Engineering

また、両大学の学生によるポスター発表会では、各技術分野における学生同士の交流も行われました(写真6と7)。この様に、経済産業省、日本UAE協会、駐日アラブ首長国連邦大使館をはじめ、様々な法人・機関・皆様のご支援をいただき無事シンポジウムを終



写真6 アブダビ石油大学ならびに東京大学の学生による研究ポスター発表(1)

【アブダビ石油大学側講演2】Energy engineering systems



Dr. Ali Almansoori
(Assistant Professor)



Dr. Ali Elkamel
(Visiting Professor), Department of Chemical Engineering



写真8 シンポジウム終了後の集合写真

【アブダビ石油大学側講演3】
Renewal energy (PV)



Dr. Lisa Lamont (Assistant Professor),
Department of Electrical Engineering



写真10 シンポジウム会場風景

了することができました(写真8~10)。この場をお借りして深く御礼申し上げます。なお、シンポジウム後には交流会が催され、引き続き活発な議論が行われました(写真11)。

(文責:エネルギー・資源フロンティアセンター 松島 潤 准教授)



写真7 アブダビ石油大学ならびに東京大学の学生による研究ポスター発表(2)



写真9 シンポジウム会場風景



写真11 シンポジウム終了後の懇親会風景

【東大側講演1】SOFC電極分極特性の3次元数値シミュレーション



東京大学エネルギー工学連携研究センター副センター長 鹿園 直毅 教授

【東大側講演2】貯留層工学における不確実性への対応



エネルギー・資源フロンティアセンターセンター長 佐藤 光三 教授

【東大側講演3】先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET)の教育研究活動



東京大学先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター 太田 豊 特任助教

3. FRCERシンポジウム「レアアースのすべてを語る — 海底レアアース泥の探査・開発から削減技術、 製錬、リサイクルまで —」開催報告

平成24年7月20日にエネルギー・資源フロンティアセンター主催(共催:東京大学エネルギー工学連携研究センター(CEE)および東京大学先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET))のシンポジウム「レアアースのすべてを語る—海底レアアース泥の探査・開発から削減技術、製錬、リサイクルまで—」が東京大学工学部武田先端知ビル(本郷キャンパス浅野地区)の武田ホールにて開催されました。本シンポジウムでは現在我が国が直面しているレアアース資源問題に焦点をあて、新しいレアアース資源「レアアース泥」の最新の研究結果についての報告を皮切りに、実際の資源開発や削減技術、製錬、リサイクルなどについて「すべてを語り尽くす」ことを趣旨として行われました。

本シンポジウムは東京大学大学院工学系研究科の原田昇研究科長の開会の辞と、東京大学理事の松本洋一郎副学長の挨拶に始まり、7件の講演が行われました。まず「日本の排他的経済水域のレアアース泥—最新の研究成果の全容—」と題して、東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンターの加藤泰浩教授より今回のシンポジウムのテーマであるレアアース泥について、特に日本の排他的経済水域内に存在するレアアース泥に関しての最新の研究成果が報告されました。続いて、「深海底鉱物資源の揚鉱技術とその応用 —エアリフトポンプ方式と応用技術—」と題して静岡大学創造科学技術大学院の齋藤隆之教授よりマンガンノジュールの開発で培われてきた深海底鉱物資源の揚鉱技術について発



東京大学大学院工学系
研究科研究科長 原田 昇



東京大学
理事・副学長 松本 洋一郎



東京大学大学院
工学系研究科教授 加藤 泰浩



大阪大学名誉教授・
学校法人重里学園理事 足立 吟也氏



インターメタルクス
代表取締役社長 佐川 真人氏



信越化学工業
技術担当部長 楠 的生氏



会場の様子



乾杯の音頭 独立行政法人海洋研究開発機構 理事長 平 朝彦氏

表していただきました。昼食を挟んで3件目には「海底油田開発・生産技術に立脚したレアアースFPSOの提案」と題して三井海洋開発の中村拓樹事業開発部長より講演がありました。現在加藤教授と三井海洋開発との間で共同研究が進んでいるレアアース泥の開発システム、特に揚泥技術の実現性について、現在の海底油田開発・生産技術の現状を踏まえながら講演していただきました。4件目と5件目には特別講演として、レアアース研究の第一人者である足立吟也先生(大阪大学名誉教授・学校法人重里学園理事)と、ネオジム磁石の発明者で今年の日本国際賞を受賞した佐川真人先生(インターメタリックス代表取締役社長)のお二人にご講演いただきました。足立先生からは「レアアースはなぜ必要か—その機能と用途—」というタイトルで、レアアースの基本的性質からその用途にいたるまで、非常に包括的な講演をしていただきました。また、佐川先生からは「レアアース磁石とレアアース削減技術」と題して講演いただきました。佐川先生が発明されたネオジム磁石の基礎から始まり、現在取り組んでおられるジスプロシウム削減技術の現状についても詳しく紹介していただきました。コーヒープレイクを挟んで

6件目には、「レアアース資源とその製錬」と題して信越化学工業の楠的生技術担当部長より講演がありました。国内レアアースメーカー最大手の立場から、最新のレアアース資源開発状況とレアアース磁石の製錬技術について紹介していただきました。最後の7件目には「レアアースの資源処理およびリサイクル技術」と題して東京大学大学院工学系研究科の藤田豊久教授より講演がありました。まずレアアース磁物の選鉱処理について実例を示しながら解説していただいた後、リサイクル技術についての最新の研究成果を報告していただきました。

あいにくの雨模様にもかかわらず、参加者数は330名にも及び、非常に盛況な講演会となりました。シンポジウムの様子は当日のうちにNHKと日本テレビのニュースでも報道され、話題を呼びました。また、シンポジウム終了後には、武田ホールホワイエに場所を移して恒例の懇親会が開催され、シンポジウム中にできなかった質問や議論など大変有意義な意見交換が続きました。

(文責:エネルギー・資源フロンティアセンター 加藤 泰浩 教授)



静岡大学創造科学
技術大学院教授 齋藤 隆之 氏



三井海洋開発事業
開発部長 中村 拓樹 氏



東京大学大学院
工学系研究科教授 藤田 豊久



閉会の挨拶
FR CER センター長・教授 佐藤 光三

4. 基礎講座「レアアース」

エネルギー・資源フロンティアセンター 加藤

レアアース [希土類元素、rare-earth elements (REE)] とは、元素周期律表第Ⅲ族に属する原子番号57から71番までのランタノイド15元素、すなわちランタン(La)、セリウム(Ce)、プラセオジウム(Pr)、ネオジム(Nd)、プロメチウム(Pm)、サマリウム(Sm)、ユ

泰浩 教授

ウロピウム(Eu)、ガドリニウム(Gd)、テルビウム(Tb)、ジスプロシウム(Dy)、ホルミウム(Ho)、エルビウム(Er)、ツリウム(Tm)、イッテルビウム(Yb)、ルテチウム(Lu)の総称である、同じ第Ⅲ族の元素番号21のスカンジウムと元素番号39のイットリウムを加えた17

元素を指す場合もあるが、本稿ではランタノイド15元素にイットリウムを加えた16元素をREYと称して区別し、スカンジウムは含めないこととする。また、ランタンからユウロピウムまでの7元素を軽レアアース (LREE)、ガドリニウムからルテシウムまでの8元素を重レアアース (HREE)と称する。

レアアースは、N殻に空席があるにも関わらず、先に外側のO殻とP殻に電子が入り、その後でN殻の空席を電子が埋めていくという特殊な電子配置を示す。そのため、素材原料として用いることで極めて独特な特性を発揮する。例えば、その磁気的特性を生かした素材としては、ネオジム・鉄・ボロン磁石(耐熱性を上げるためにジスプロシウムも添加される)やサマリウム・コバルト磁石があり、特に前者は「最強の永久磁石」としてハイブリッドカーのモーターやハードディスクなどに広く使用されている。また、ユウロピウムやテルビウム、イットリウムは優れた蛍光特性を持つことから、古くはブラウン管カラーテレビ、現在ではLED電球や液晶テレビのバックライトなどに用いられている。同じく発光材料としては、ネオジム、ホロニウム、エルビウム、ツリウム、イットリウムが工業用や医療用レーザーの発振材料に、セリウム、ガドリニウム、ルテシウム、イットリウムがPET(ポジトロン断層法)装置などに使われる放射線検出用シンチレータ単結晶の材料に使用されている。また、水素吸蔵量が多いランタンやセリウム、サマリウムなどを用いたレアアース合金がニッケル水素電池用の水素吸蔵合金として、ランタンを用いたイオン伝導性セラミックスが固体電解質形燃料電池の電極材として用いられている。そのほかにも、デジタルカメラや望遠鏡、顕微鏡に使われる光学ガラス材料としてランタン、ガドリニウム、イットリウムが、DVDやブルーレイディスクなど光ディスクの記録層にガドリニウム、テルビウム、ジスプロシウムが、半導体や液晶ガラス基盤の研磨剤や、自動車用排気ガス浄化触媒、石油精製用のFGC触媒としてランタンやセリウムが使われている。このようにレアアースの最先端産業分野での利用は多岐にわたっており、現代社会には無くてはならない元素であるといえる。

レアアースの用途はそれだけではない。レアアースの持つ独特な磁気的特性や光学的特性は最新軍事技術にも不可欠のものである。例えば、巡航ミサイルやスマート爆弾などのミサイル誘導・制御システムには、プラセオジウム、ネオジウム、サマリウム、ジスプロシウム、テルビウムなどが使われ、人工衛星、潜水艦のソナー、監視レーダーなどの通信システムにはランタン、ネオジウム、ユウロピウム、ルテシウム、イットリウムなどが、戦車や携帯用火器のレーザー照準システムにはユウロピウム、テルビウム、イットリウムなどが使われている。また、そのほかにも、戦闘機のジェットエンジン用耐火材にはイットリ

ウムがイットリア安定化ジルコニアとして使われている。このようにレアアースは安全保障の面からも最重要視されている資源である。

以上のように、レアアースは我が国の最先端産業を支える最も重要な資源であるが、その97%を中国一国が生産する脆弱な供給構造を持つ。かつて中国は安価なレアアースを大量に輸出し、外貨を獲得する資源輸出奨励策をとっていたが、2005年以降は環境保護、自国資源の長期的保護、内需拡大のための国内産業の発展などを目的として、鉱山での採掘量規制や輸出量規制、輸出関税の導入など規制強化政策へ急激な転換を図っており、レアアースの供給不足や価格急騰が懸念されてきた。そして、2010年9月の尖閣諸島沖での漁船衝突事件をきっかけとして、中国は実際にレアアースの輸出停止・制限を行い、日本だけでなく欧米をも巻き込んで世界中にレアアースショックを与えた。このレアアース輸出停止措置は10月末には解消されたものの、その後も中国は2005年以降の5年間で国内のレアアース埋蔵量が激減したと発表し、レアアース開発企業の集約化やレアアース探鉱権・採鉱権の全面整理、レアアース資源税の引き上げなどさらなる生産管理の強化を進めている。それに伴って2011年に入ってからレアアース価格は暴騰し、8月の価格は1月と比べて3倍から10倍に達する高値を更新した。2013年5月の時点では価格は下落しており、ランタンやセリウムなど安価な軽レアアースは2010年の価格に戻っているものの、最重要と考えられるジスプロシウムやテルビウムなどの重レアアースやユウロピウムなどは依然として高い水準で推移を続けている。それに加えて、中国は内モンゴル自治区や江西省の主要レアアース鉱山の生産を停止して生産量調整を行い、価格のコントロールにも努めている。また、レアアース価格の高騰は国内レアアース産業に大きな影響を与えており、国内業者はレアアースを使用した製品の値上げを余儀なくされている。中国は国内販売価格と輸出価格に差をつけることで、日本をはじめとする海外企業の生産工場の国内誘致を強く推進している。これにより、日本の最先端産業の生産技術流出が強く懸念されている。さらに中国は、尖閣諸島沖の漁船衝突事件でも明らかになったように、レアアース資源を外交カードとして利用しており、レアアースの安定確保は日本にとって喫緊の懸案事項であるといえる、これに対して我が国は(1)代替材料・使用量低減技術開発、(2)リサイクルの推進、(3)国内レアアース産業支援、(4)海外の鉱山開発・権益および供給の確保など、レアアース安定供給に向けて重点的な取り組みを進めているが、未だ根本的な解決には至っていないのが現状である。

5. アブダビ石油大学との協定締結

東京大学内エネルギー関連3センターであります、エネルギー資源フロンティアセンター(FRCER)、エネルギー工学連携研究センター(CEE)、先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET)は2年間にわたりアラブ首長国連邦アブダビ石油大学殿と教育・研究に係る連携の可能性を協議してきて、最終的に平成25年3月4日にアブダビ石油大学殿と東京大学大学院工学系研究科間で大学間協定を締結いたしました(写真1)。



写真1 アブダビ石油大学で行われた大学間協定の様子。左:アブダビ石油大学 Ismail A. Tag学長、右:先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター(APET)池田久利教授

の学科の学問領域は上述の東京大学内エネルギー関連3センターと合致します。

なお、一連の連携事業は、経済産業省が進める「国際資源開発人材育成事業(石油・天然ガス分野)」の委託事業(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)「アブダビ石油大学と我が国大学等との連携促進」の一環を成すものでした。この事業の背景として、我が国の石油・天然ガス開発分野では、

- (1)低油価時代が長く続いたことによる資源開発産業自体の低迷
- (2)職業としての魅力が乏しいとのイメージによる進学・就職を希望する学生の減少
- (3)近年の学部及び大学院の改組・大括りの動きの中での石油・天然ガス開発の上流部門の専門教育のレベルの低下
- (4)大学教員の関連他分野への流出の進展など、様々な問題が顕在化してきています。

その一方で、近年世界の資源消費量の拡大、石油・天然ガス資源の国有化の進行により、エネルギー資源の国際需給が逼迫・複雑化してきているとともに、高度な技術スキルが必要となる開発案件が急速に増加しています。この問題に対処するための一つの柱が「アブダビ石油大学と我が国大学等との連携促進」

プログラムで、本邦大学と産油国大学等との連携を促進することにより、我が国の大学生に海外の大規模産油国やその事業を体験する機会を創出することが目的です。石油・天然ガスの大規模開発現場では、要求される技術が高度化・専門化するとともに、システム全体を見渡す技術マネジメント力や国際的な現場力を備えた技術者が開発現場の管理者として大きなプロジェクトを運営管理しています。我が国の学生にこのような海外石油開発現場を体験することの意義は大きいものの、機会が極めて少ないのが現実であります。

一方、産油国では、加速的に国内産業育成を目指していて、我が国の産業基盤技術などを学生に学ばせる機会を探しています。産油国と我が国のニーズを組み合わせ両国共にメリットのある共同教育・研究等を促進することが求められています。

アブダビ石油大学は、2000年にアブダビ国営石油を中心として5つの石油会社(アブダビ国営石油/ADNOC, Royal Dutch Shell, BP, Total S.A, ジャパン石油開発(株))の資金支援により、優秀な技術者をアブダビの石油・ガス産業に送り込むことを目標に設立された大学であります。2007年には大学院修士課程を設置するなど、まだ若い大学ではありますが、2013年度には研究センターを設立するなど急速な成長をしています。とりわけ、先進的な企業・大学との国際連携が盛んに行われており、企業では上述の石油メジャーをはじめとした世界の有力企業、大学ではコロラド鉱山大学、ミネソタ大学、ライス大学、メリーランド大学など世界の有力大学と連携しています。アブダビ石油大学の学科構成は5つの学科(機械工学、電気工学、化学工学、石油工学、石油地球科学)となっており(最近ではこれに加えて金属科学が新しく創設されたようです)、これら

加えて、アラブ首長国連邦は、国際再生可能エネルギー機関 (IRENA: International Renewable Energy Agency)の事務局本部を国内に誘致し、再生可能エネルギーの開発と普及を主題にした世界エネルギーサミット「World Future Energy Summit」を2008年より毎年主催し、さらにゼロエミッション環境都市を目指したマスター・シティ計画など、次世代エネルギー分野でも世界をリードしつつあります。中東地域の将来像として、石油供給のみならず再生可能エネルギーも含めた世界のエネルギー供給の中心となることが予想できます。さらに、この中心化は、中東諸国が経

済成長や国際政治の一つの極を担う可能性を秘めているとも考えられます。このような観点から、中東地域との連携強化は必然的であると云えます。

2年間にわたる協議では、両機関の多彩な学術研究・教育の基盤を互いに良く理解し、新たな学術研究交流の創造と確かな人材育成のあり方等について議論する場を創出するために、両大学の教員・学生15名程度の相互訪問をはじめ、小グループでの相互訪問を積み重ねて相互理解に努めました。東大側メンバーがアブダビを訪問した際には、油田見学(写真2)、技術発表会(写真3)、ラボツア



写真2 North East Bab油田を訪問し、現場責任者から説明を受ける



写真3 技術発表会(於:アブダビ石油大学)の様子



写真4 石油工学科の掘削シミュレータ施設見学



写真5 砂漠ツアーにおけるラクダ乗り(乗組員はCEE堤教授)

一(写真4)、連携に係る協議会、砂漠ツアー(写真5)を実施していただきました。

一方、アブダビ石油大学の教員・学生ご一行が来日された際には、上述のシンポジウム開催に加えて、連携に係る協議会(写真6)、ラボツアー(写真7)、学生向けには日本文化に触れる茶道教室体験(写真8)、日本の最先端技術に触れる(独)海洋研究開発機構ツアー(写真9)を実施しました。一連のイベントを通して学んだことは非常に多く、アブダビは研究・開発に係る世界のハブであることも実感できました。今後は、共同研究をベースにして交流と人

材育成を行っていくことを予定しております。また、アブダビでは女子教育にも大変力を入れており、女子学生交流プログラムも企画しています。

最後になりましたが、本連携事業を遂行するにあたりまして、駐日アラブ首長国連邦大使館、経済産業省、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構、国際石油開発帝石株式会社はじめ関連する組織に多大なるご支援・ご教示をいただきました。この場を借りまして、厚く御礼申し上げます。

(文責:エネルギー・資源フロンティアセンター 松島 潤 准教授)



写真6 連携に係る協議会(於:東京大学)



写真7 小グループに分かれてのラボツアーの様子



写真8 茶道教室を体験するアブダビ石油大学の学生(於:工学系研究科国際交流室)



写真9 東大学生との交流も兼ねて日本の深海技術を視察するアブダビ石油大学の学生(左から1番目と2番目)。引率はFR CER小林准教授(右端)(於:(独)海洋研究開発機構)

6. トピックス

(1) JX日鉱日石開発株式会社寄付講座の開設について

東京大学大学院工学系研究科におけるJX日鉱日石開発株式会社寄付講座の開設について —環境調和型エネルギー資源開発手法の構築を目指して—

東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンターとJX日鉱日石開発株式会社は、エネルギー資源開発プロジェクトに関わる操業の最適化を研究目的とし、環境負荷を抑えながら資源回収率向上を達成する開発手法論の構築を目指し、「環境調和型エネルギー資源開発工学（JX日鉱日石開発）寄付講座」を、平成25年4月から5年間にわたり開設することいたしました。

世界的なエネルギー需給の逼迫により、在来型に加えて非在来

型エネルギー資源（シェールガス・オイル、超重質・重質油等）の開発が現在急激に進められています。一方で、難回収性貯留層からの人工採集には環境負荷の増大も懸念されています。本寄付講座では、エネルギー資源開発プロジェクトに関わる情報収集から開発・生産に至る各ステージにおける操業の最適化を研究目的とし、環境負荷を抑えながら資源回収率向上を達成する開発手法論の構築を目指します。

【寄付講座の概要】

1. 講座名称：環境調和型エネルギー資源開発工学（JX日鉱日石開発）寄付講座

英文名：Environment-harmonized Energy Development Laboratory (JX NOEX)

2. 設置場所：東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター

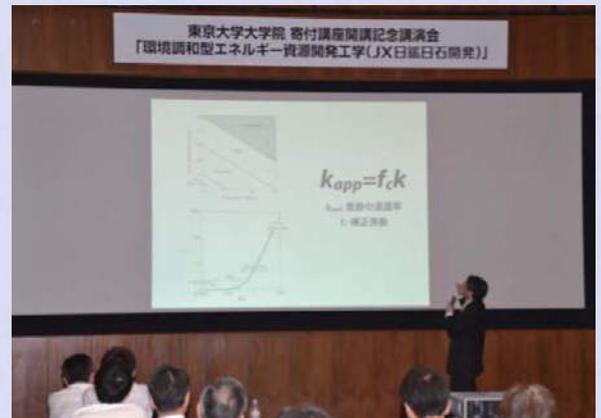
3. 設置期間：平成25年4月1日から平成30年3月31日までの5年間

4. 寄 付 者：JX日鉱日石開発株式会社

5. 担当教員：東京大学教授 佐藤 光三

エネルギー・資源フロンティアセンター特任教員（現在選考中）

6. 研究内容：① 資源開発プロジェクトへの参入ならびに開発過程での意思決定に際しての情報の価値の定量評価
② 難回収性貯留層開発における環境攪乱の最小化と資源回収の最大化を両立する技術の開発・最適化



(2) JOGMECとの共同研究紹介

地下メタンガスの堆積物の生物回復のためのタンパク質注入法の開発

エネルギー・資源フロンティアセンター（FR CER） ハビエル・ビルカエス 助教

石油回収を高めるために石油貯留層へのCO₂の注入（CO₂-EOR）は今最も人気を集めている方法である。多くの油田で行われている水攻法は石油の30～50%を取り残してその回収の限界に近づいているためである。実験結果は、多量の石油が、CO₂注入により回収することができると示しており、さらにCO₂の注入は、適切な条件下でCO₂の地中貯留に結合することができる。しかしながら、地中のCH₄鉱床の20%が微生物由来であることは一般に認められているが、注入CO₂や残石油の一部を土着微生物によってCH₄に変換する可能性は最近まであまり研究されていなかった。

本研究の最後の目的は、貯留層に残っている石油をH₂に変換できる地中常在の微生物と注入CO₂をCH₄に変換できるやはり地中常在のメタン菌とを刺激することによって、地下のCH₄鉱床を還元する方法を開発することである。

一般的にメタン菌によるCO₂のCH₄への還元は、H₂の可用性に依存することが認められている。水素は、CO₂をCH₄に変換する際の電子供与体として機能する。地下の環境ではH₂は水と硫化物の水熱反応や、水—岩間の相互作用から、あるいは土着微生物により石油から生成することができる。地球の地下にはアクセスしにくい

ので、残石油の発酵からH₂を供給することが最も現実的な選択肢として生じる。酵母エキスを石油貯留層の水に添加した時の反応についての測定結果は、

- 1) H₂を生成する土着微生物の能力は、この重要な栄養素の添加に比例して増加すること、および
- 2) CO₂はH₂生成微生物と共存する土着メタン菌によってCH₄に変換することができることを示している。

これらの情報に基づいて、本研究では、地下CH₄鉱床を復元するために、残石油からH₂の微生物生成を刺激するために酵母エキスのような栄養素を注入し、それによって注入あるいは生成されたCO₂からCH₄を生成するという方法のフィールドでの実現可能性を調査・評価する。

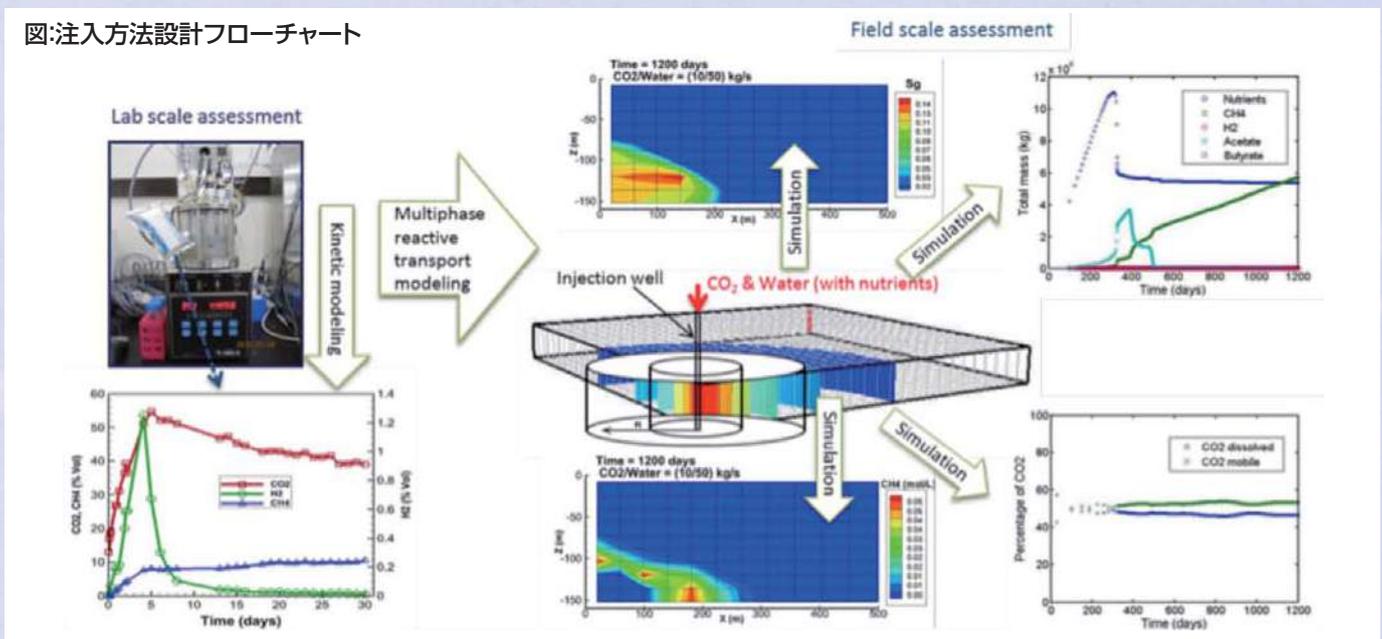
酵母エキスのような栄養素を添加した時の石油貯留層の水に含まれる土着微生物の反応は、バッチ反応器を用いて非常によく確立された手順に従って測定することができる。しかし、有機栄養素の刺激効果を予測するために静的な条件下で得られたこれらの結果を地下の条件に適用させるのは簡単ではない。地下条件下でのCO₂と有機栄養素の注入に対しての土着微生物の反応は、H₂とCH₄の生成に関与する各成分の複合多輸送と反応速度の結果による。加えて、地層や、流体の成分、流量、および地層の形状の巨大な多様性は、別々の対処を必要とする非常に異なるシナリオにつながる。したがって、実験室とフィールド環境とのギャップを埋めるために本研究で採用した戦略は、TOUGHREACTシミュレータを基にして反応輸送モデルを開発することにある。シミュレータは微生物の増殖、CO₂の溶解トラッピング、鉱物トラッピング、多孔性/透磁率

の変更、反応性多孔質媒体の中でCO₂からメタンを生成の複雑な相互作用を理解するために使用される。このメカニズムの理解は、有機栄養素をCO₂と一緒に注入した時に、土着微生物によるH₂とCH₄の生成や、それがCO₂の地中貯留またはCO₂-EORへ与える影響を支配する制御因子を同定することを目指している。これに対して、TOUGHREACTシミュレータの能力を拡大して、反応性多孔質媒体内の複数の微生物反応速度論と三相流を考慮できるようにしている。確立したこの多相反応輸送モデルで、例えば、枯渇石油貯層へのCO₂と有機栄養素注入の効果や、マトリックス岩の炭酸塩鉱物の含有量の影響、構成する微生物の影響、並びにCO₂と水の注入比の影響などを調べたい。知る限り、これはCO₂の地中貯留とCO₂-EORにおける物理学的、流体力学的、地球化学的、微生物学的複合プロセスを定量化し、予測するために使用できる、初めてのモデルと計算プログラムである。

地下CH₄鉱床を復元する注入方法の設計は、実験と計算手法を組み合わせ、その設計プロセスは大体次の手順で構成されている(図参照)。

- 1) 石油と貯留層水のサンプリング
- 2) 選択された栄養素(例えば、酵母エキス)に対する貯留層水中の土着微生物群集の反応の測定
- 3) 反応ネットワークのモデリングと関連微生物媒介反応の速度論
- 4) TOUGHREACTシミュレータが提供する多相反応輸送フレームワークへの運動反応モデルの実装
- 5) CH₄生成の混相流反応性輸送のシミュレーション
- 6) 注入法の最適化

図:注入方法設計フローチャート



現時点までにTOUGHREACTシミュレータに加えられた改良により、シミュレータは複数の微生物の運動反応の計算が可能である。気相と水相とに分かれているCO₂は、有機または無機由来でありうる。しかしながら、気相の流体の流動特性に対する、生成されたH₂とCH₄の影響はまだ考慮されていない。これには、ガス混合物のための状態方程式を取り入れることが必要である。TOUGHREACTへのH₂とCH₄の影響を計算する機能の追加により、多様な条件下の塩水帯水層と石油貯留層におけるCO₂地中貯留とCO₂-EORへの地球化学的、流体力学的、および微生物学的反応の影響を評価することができるようになる。

(3) 受賞

- 博士課程3年・鈴木博之(指導教員:FR CER松島潤准教授)
公益社団法人物理探査学会第124回(平成23年度春季)
学術講演会優秀発表賞
講演題目:「音波検層の合成波形記録作成による震源
カップリング効果と散乱減衰の評価」



博士課程3年・鈴木 博之

センターの構成

センター長	佐藤 光三 教授
フロンティア技術研究部門	佐藤 光三 教授、 増田 昌敬 准教授
複合知創成部門	加藤 泰浩 教授、 ハビエル ビルカエス 助教
エネルギー・資源俯瞰部門	松島 潤 准教授、 長縄 成実 助教
社会連携講座(INPEX) 持続型炭素循環システム工学	佐藤 光三 教授(兼任)、 小林 肇 准教授
環境調和型エネルギー資源開発 工学(JX日鉱日石開発)寄付講座	佐藤 光三 教授(兼任)、 専任教員(選考中)

※本ニュースレターに掲載された記事を転載・引用する場合は、事前に当センター事務局までご連絡下さい。

編集・発行

東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティアセンター
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 電話&ファックス: 03-5841-0243
メール: office@frcer.t.u-tokyo.ac.jp URL: www.frcer.t.u-tokyo.ac.jp