

はしがき

日本の水溶性天然ガスは年間生産量が約5億 m^3/year （2011年）と量的に少ないが、古くから国産エネルギー資源として千葉、新潟、宮崎の各地域において開発が進められ、わが国独自の生産技術を確立してきた。また、附随水から抽出されるヨウ素は年間生産量が約9.5千 ton/year （2011年）で海外にも輸出されている貴重な資源である。

水溶性天然ガス田の生産挙動は、ガス鉦床の地質および地質構造、かん水の賦存状態、生産量および還元量、生産方式（自噴採取、人工採取）など相互に関係しあった現象である。上記の3地域における生産挙動については、これまで専門的に関係するそれぞれの分野で、個々に、優れた知見が個別に蓄積されている。しかしながら、生産システムを設計および診断しようとするとき、生産システム全体を見据えて、これを構成する貯留層、坑井、地表配管、地上設備等の各要素について流体の運動に的を絞ってわかりやすく解説した図書がどうしても必要であろう。

本書は、こうした観点から、主に新潟および千葉地域の水溶性天然ガス田における生産システム、生産特性、関連する諸現象等の問題を体系的に整理し、生産システムの各構成要素における流動挙動の解析原理と解析方法について、資源開発工学を学んでいる学生や現場で水溶性天然ガス生産に係わっている技術者に理解できるように、優しくかみ砕いて解説することを意図して執筆したものである。

全体は9章からなり、第1章では生産システムの概要、第2章では貯留層内の流動原理、第3章では坑井を中心とした放射状流の解析、第4章では圧力遷移試験の解析、第5章ではインフロー挙動の解析、第6章では坑内の流動解析、第7章では地表パイプライン内の流動解析、第8章では人工採取井の流動解析そして最後の第9章では生産システムの最適設計や診断の基礎であるシステム解析について記述した。特に、第6章では将来海底メタンハイドレート層からのメタンガス生産が可能になった場合を想定し、生産井に対する水溶性天然ガス井の流動解析原理の応用可能性について触れている。各章ごとに例題や演習問題をあげ、理論式の誘導はできるだけ例題や演習問題にとり入れ、読者の理解を深め、応用力を培っ

でもらうことに意を用いた。また、実際問題の解決に容易に適用できるように、著者の作成した計算プログラムをダウンロード形式で提供している。付録にはその計算プログラムにおける入力データと計算結果の出力の関係を示し、利用に便宜を図っている。

本書の特色は以上のようなものであるが、著者の浅学非才のため本書の内容のほとんどすべてを多くの内外の文献によっており、著者の考えで「水溶性天然ガス生産システムの挙動解析」としてまとめたものである。繰り返し通読し誤りのないことを期したが、なお誤りのあることを恐れている。読者諸賢から問題点のご指摘を是非お願いしたい。

本書は水溶性天然ガス生産システムを対象とした流動挙動の解析原理および解析方法を示したものであるが、地下資源開発を目指す学生および石油・天然ガスなどの流体エネルギー資源の生産現場で働く技術者にとっても基礎知識となりうる内容である。本書を基礎として水溶性天然ガスのみならず流体エネルギー資源に関する新しい生産技術の習得に努められることを望む。

最後に、本書の執筆にあたり引用させていただいた参考文献の著者に深く感謝の意を表す。また、出版にあたり、貴重な御意見と御尽力を賜った技報堂出版 星憲一氏と、原稿の完成途上にいろいろお骨折りいただいた秋田大学国際資源学部 小助川洋幸氏に心からお礼申し上げたい。

2015年1月

秋 林 智

第 1 章 緒 論

本章では水溶性天然ガスとはどんなものか、それはどのような仕組みで生産されるのか、また生産に伴ってどんな問題が起こるのか、そして単位の換算など第 2 章以降の生産システムにおける流動挙動の解析原理と解析方法を説明する上で必要な事項について学ぶ。

1.1 水溶性天然ガス生産システムの概要

水溶性天然ガス (natural gas dissolved in brine) とは、可燃性天然ガスの一種であり、ガスの全部またはほとんど大部分が地層水に溶解した状態で鉱床を形成しているもので、メタンガス (methane gas) を主成分とする乾性ガス^{*1} (dry gas) である⁷⁾。また、地層水 (formation water) は、イオン化したヨウ素 (iodine) を含有し、塩分 (salinity) が降水や河川水のような天然の淡水 (fresh water) よりも高く、pH 値がおよそ 6 ~ 8 程度で、地温 (geothermal temperature) またはそれより若干低い温度を有する。

水溶性天然ガスの主体は地層水に溶解しているガスであるが、ガスの生産に伴って大量の地層水が産出される。これを付随水 (associated water) という。その生産の仕組みは、貯留層に掘削した坑井 (well) によって汲み上げられた地層水が地表配管 (surface pipe line) (以後フローラインと呼ぶ) を経由してセパレータへ送られ、地層水からガスを分離し生産するものである。その仕組みを生産システム (production system) という。

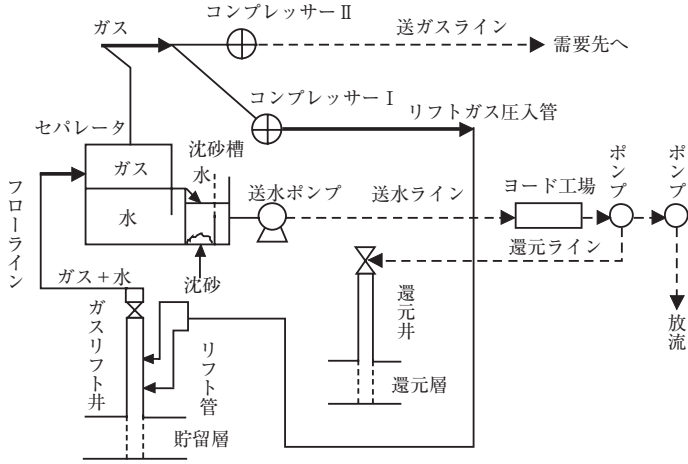
生産システムは基本的に開発対象地域の立地条件とガス鉱床の存在状態に基づい

* 1 乾性ガスとはメタン (CH₄) を主成分とし、プロパン以上的高级炭化水素をほとんど含まない可燃性天然ガスである⁹⁾。

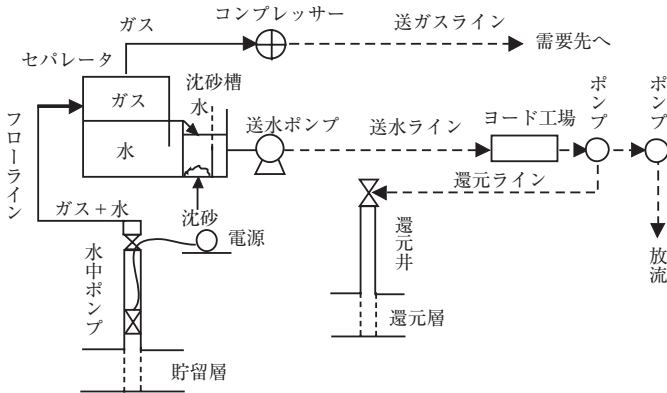
て設計された坑井仕上げ，生産量，生産方法，坑井配置，地上設備を有する生産基地や配管経路などから構成されるため，その構成は地域によって異なる。しかしながら，いずれの地域においても生産システムは，図-1.1 に示すように貯留層 (reservoir)，坑井 (well)，フローライン (flow line)，セパレータ (separator) などの基本的要素から構成された生産ライン (production pipeline) に還元ライン，送水ライン，送ガスラインが接続している。セパレータと還元ライン (reinjection pipeline) および送水ライン (water transportation pipeline) とはそれぞれポンプ (pump) およびコンプレッサー (compressor) を介して接続している。一方，送ガスライン (gas transportation pipeline) はセパレータからコンプレッサーを介して接続している。

生産システムにおける貯留層はその形状や広がり，地層を構成する岩石や流体の存在状態および性状を詳細に把握することが難しく，不確定な要因が多い。それに対して坑井，坑口装置，フローライン，セパレータなどの要素から構成される設備は人間によって構築された人工構造物であるため，確定的なものである。このように水溶性天然ガスの生産システムは，天然の地層 (natural formation) と人工構造物 (artificial structure) の結合した点に特徴がある。

図-1.1 (a) はガスリフトによる配管系統 (pipeline system) を，(b) はポンプ採取による配管系統を示す。図-1.1 (a) において，ガスリフト井の圧入ガスには現地でも回収したメタンガスの一部がコンプレッサー I によってリフト管 (lift tube) を経由して坑内の湛水面 (water level) 以下の深度に圧入される。このように生産を目的として圧入するガスをリフトガス (lift gas) という。坑内における地層水とガスの混合流体は，流体の密度差とガスの膨張エネルギーによって坑口へ上昇し，坑口からフローラインを経由してセパレータに入る。セパレータ (separator) では圧力を調節することによってガスと地層水に分離される。前者を分離ガス (separated gas) といい，後者を分離水 (separated water) という。分離ガスは通常コンプレッサー II を介して需要先へ送られるが，ガスリフト井を用いた生産システムの場合にはその一部がコンプレッサー I によってリフトガスとして再び生産井に圧入される。一方，分離水は自然流下または送水ポンプによって送水ラインを経由してヨード工場 (factory for extracting iodine) へ送られ，ヨウ素を抽出した後にポンプ圧入または自然流下により還元ラインを経由して還元井 (reinjection well) から地下還元層へ戻されるか，または河川や海へ放流される。



(a) ガスリフトによるパイプライン



(b) ポンプ採取によるパイプライン

図-1.1 典型的な水溶性天然ガス生産システムにおける配管系統の概念

図-1.1 (b) に示すように水中電動ポンプ (electrical submersible pump) を用いた生産システムでは、汲み上げられた地層水とガスの混合流体はフローライン (flow line) を経由して直接セパレータへ送られ、ガスと水に分離される。分離ガスはリフトガスとして利用せず、すべてコンプレッサーを介して送ガスラインを経由し需要先へ送られる。一方、分離水はガスリフトを用いた生産システムの場合と同様

に送水ラインを経由しヨード工場へ送られ、ヨウ素抽出後に地下還元または放流される。

図-1.1において貯留層からセパレータまでのパイプライン（リフトガス圧入管を含む）内の流体の流れは、それらの間のどの要素の圧力が変化しても影響を受け、流体力学的に連続している。このパイプラインを生産ライン（production pipeline）という。それに対して、還元ラインの流体輸送は標高差を利用した自然流下（後述の1.3.1項参照）またはポンプにより行い、また送水ラインおよび送ガスラインの流体輸送はポンプまたはコンプレッサーにより行うので、それらのパイプライン内の流れはセパレータの圧力が変化してもその影響を直接受けることがない。そのため、後述の流動解析では還元ライン、送水ライン、送ガスラインは生産ラインに対して流体力学的に独立しているものとして扱われる。

1.2 生産システムの基本的構成要素

本節では、図-1.1に示す生産システムを構成する基本的要素である貯留層、坑井、フローライン、セパレータについて概要を説明する。

1.2.1 貯留層

貯留層（reservoir）とは、一般に多孔質岩の孔隙中に地層水やガスなどの流体が連続相として存在する地層をいう。多孔質岩を貯留岩（reservoir rock）といい、地層水やガスを貯留層流体（reservoir fluids）と呼ぶ。典型的な水溶性天然ガス貯留層（reservoir dissolved natural gas in brine）は、後述の図-1.2に示すように不透水層（impermeable formation）に挟まれ、被圧された状態で存在する。一般に貯留層流体はその深度における貯留層圧力（reservoir pressure）と地温（geothermal temperature）に相当する溶解度（solubility）のガスを溶解し、塩分（salinity）を含んだ地層水である。この地層水は塩分を含んでいるためかん水（brine）という。

以下では、日本の水溶性天然ガス鉱床の典型的な地質構造（geological structure）および挙動（behavior）と圧力勾配（pressure gradient）について述べる。

(1) 新潟地域水溶性天然ガス鉱床

新潟地域（Niigata region）の水溶性天然ガス鉱床（reservoir of natural gas dis-

2.2 貯留層の物理的性質と流れの原理

第1章で述べたように水溶性天然ガス貯留層は多孔質貯留岩からなり、掘削された坑井で生産すると坑底および坑井周辺地層の圧力が低下し、かん水中の溶解ガスが遊離するため流体は水単相状態からガス水二相状態へ変化する。そのような貯留層中のかん水の流れはダルシーの法則に従い、圧力分布や貯留層の物理的性質の影響を受ける。

本節では、孔隙率、有効応力、圧縮率、飽和率、層厚、毛管力、水頭、浸透率、水理伝導率など貯留岩の物理的性質 (physical properties of reservoir rock) と多孔質媒体 (porous medium) 中の流れの原理であるダルシーの法則について説明する。

2.2.1 貯留層の物理的性質

(1) 孔隙率

貯留岩の全体積 V は基本的に固体粒子の体積 V_r と孔隙体積 V_p の和である。孔隙体積 V_p はまた孔隙同士が連続している有効孔隙体積 V_{pe} とまったく孤立した孔隙の体積 V_{pis} の和であるから、 V は次式で表される。

$$V = V_r + (V_{pe} + V_{pis}) = V_r + V_p \quad (2.64)$$

式 (2.64) の両辺を V で割ると

$$1 = V_r / V + (V_{pe} / V + V_{pis} / V) = V_r / V + V_p / V \quad (2.65)$$

i) 絶対孔隙率

式 (2.65) の右辺第二式 2 項より、絶対孔隙率 (absolute porosity) は貯留岩の全体積 V に対する全孔隙体積 V_p の比として次式で定義される。

$$\phi_a = V_p / V \quad (2.66)$$

ここで、 ϕ_a は絶対孔隙率である。

ii) 有効孔隙率

式 (2.65) の右辺第一式括弧内 1 項より、有効孔隙率 (effective porosity) は貯留岩の全体積 V に対する有効孔隙体積 V_{pe} の比として次式で定義される。

$$\phi_e = V_{pe} / V \quad (2.67)$$

ここで、 ϕ_e は有効孔隙率で貯留層流体の生産に寄与する重要な物理量である。

$$\left(1 - \frac{p_{wf2}}{\bar{p}}\right) = 1 - \frac{4.0}{6.5} = 0.385$$

$$FE = \frac{2.25[(0.154)(216) - (0.385)(108)]}{(0.154)^2(216) - (0.385)^2(108)} \approx 1.72(-)$$

5.4 スキン効果の定式化

第3章 3.1.5 項ではスキン効果の概念について定性的に簡単にふれたが、本節ではスキン効果に関する Hawkins の式、スキンによる有効半径およびスキンの構成要素について理論的に説明する。

5.4.1 Hawkins の式

障害を受けた坑井近傍貯留層のスキン効果に関しては Hawkins の研究 (Hawkins, MF, Jr.: 1956) がある。図-5.16 は典型的な坑井近傍の障害領域の概念を示す。この図における r_w は坑井半径、 r_s は障害を受けた領域の半径、 k は障害を受けない貯留層の浸透率、 k_s は障害を受けた領域の浸透率、 h は層厚、 r_e は貯留層外側境界の半径、 p_e は貯留層外側境界圧力である。

図-5.17 は理想坑井 (ideal well) の圧力曲線 p_{ideal} と実坑井 (real well) の圧力曲線 p_{real} を示す。この図の記号を用いてスキン効果について理論的に考えてみよう。障害領域の外側半径 r_s における圧力 p_s と理想坑井の流動坑底圧力 $p_{wf, ideal}$ 間との圧

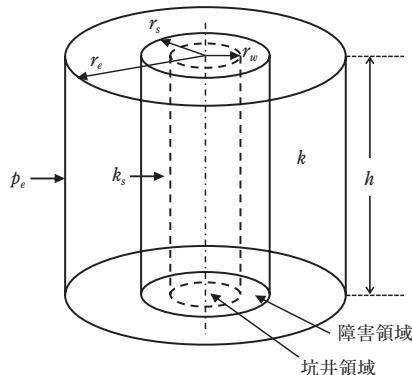


図-5.16 障害を受けた坑井近傍貯留層の概念

7.3 水平パイプ内の全圧力損失の計算方法

7.3.1 ガス水二相流

水平パイプの全圧力損失勾配の式 (equation of total pressure loss gradient) は、前述の式 (7.19) において $\theta = 0$ とおくと

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{\frac{f_{tp} G_m v_m}{2D}}{1 - \frac{\rho_{tp} v_m v_{sg}}{p}} \quad (7.37)$$

ここで、 $dx = dL$ である。

全圧力損失の増分 Δp に関して解くと

$$\Delta p = \left[\frac{\frac{f_{tp} G_m v_m}{2D}}{1 - \frac{\rho_{tp} v_m v_{sg}}{p}} \right] \Delta x \quad (7.38)$$

式 (7.38) において Δx を固定し、圧力損失の増分 Δp を計算する手順について説明しよう。図-7.6 は水平パイプ内の圧力損失を計算するための説明図である。

- ① まず、水平パイプを間隔 Δx で等間隔に分割する。
- ② 各区間における圧力増分 Δp の推定値を設定し、既知の p_1 を用いて計算を開始する。
- ③ 2点間 (図-7.6 中の1と2) の平均圧力 \bar{p} 、平均距離 \bar{x} を計算する。

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad \bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

- ④ 距離 $x + \Delta x/2$ での平均温度 \bar{T} (絶対温度) を決定する。

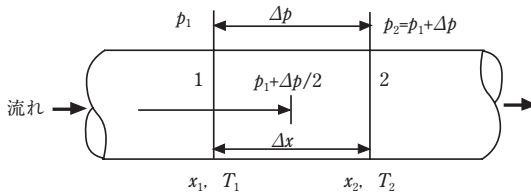


図-7.6 水平パイプ内の圧力損失計算の説明図⁴⁾

$$\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2$$

- ⑤ \bar{T} と \bar{p} における R_s , B_w , μ_w , μ_g , σ_w , z の値を第2章のそれぞれの物性値の評価式から計算する。
- ⑥ かん水の比重 γ_w を第2章の式 (2.55) から求める。
- ⑦ 各区間の平均圧力 \bar{p} と平均温度 \bar{T} でのかん水の密度 ρ_w とガスの密度 ρ_g を計算する。

かん水の密度は、第2章の式 (2.54), 式 (2.55) および式 (2.28) より

$$\rho_w = \frac{\rho_{w,pure} \gamma_w + \rho_{air} \cdot \gamma_g \cdot R_s}{B_w}$$

ガスの密度は、第2章の式 (2.26a) と (2.28) より

$$\rho_g = \frac{\rho_{air} \gamma_g \bar{p}}{TRz}$$

- ⑧ かん水流量 q_w とガス流量 q_g を計算する。

第2章の式 (2.46a) より

$$q_w = q_{w,sc} B_w$$

遊離ガス量は、産出ガス水比 GWR と溶解度 R_s の差を用いて、第2章の状態方程式 (式 (2.19a)) より

$$q_g = \frac{z q_{w,sc} (GWR - R_s) \bar{T}}{\bar{p}}$$

- ⑨ 実際のガスのみかけ速度 v_{sg} , かん水のみかけ速度 v_{sw} , みかけの混合速度 v_m を計算する。

$$v_{sg} = \frac{q_g}{A_p}$$

$$v_{sw} = \frac{q_w}{A_p}$$

$$v_m = v_{sg} + v_{sw}$$

ここで、 A_p はパイプの断面積である。

- ⑩ ガスの質量速度 G_g , かん水の質量速度 G_w , 全質量速度 G_m を計算する。

$$G_g = \rho_g v_{sg}$$

$$G_w = \rho_w v_{sw}$$

$$G_m = G_g + G_w$$

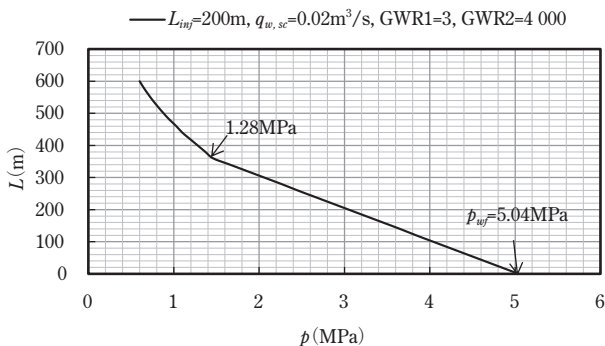


図-8.6 外吹込管方式ガスリフト井の圧力勾配 (付録B第8章(3)参照)

8.2 ポンプ採取

ポンプ採取 (pump-assisted lift) は、坑内に挿入したポンプを用いて流動坑底圧力を低下させることによって坑井の生産性を向上させる手段の1つである。前述したガスリフト法では流動坑底圧力を減少させ、チュービング内の圧力勾配を低下させるのに対して、ポンプ採取法はむしろチュービング底部の圧力を増大し、十分な量の液体 (水) を地表へ押し上げるというものである。使用するポンプにはいろいろな種類のものがあるが、その中でも水溶性天然ガスの生産に広く使用されている水中電動ポンプについて説明しよう。

水中電動ポンプ (Electrical Submersible Pump; 略記 ESP) は遠心ポンプ (centrifugal pump) であり、羽根車の回転による遠心力で液体にエネルギーを与え、この液体をポンプ軸と直角方向に吐出するものである。羽根車の出口側には渦巻室を設け、ここで羽根車を出た液体のもつエネルギーを有効に圧力エネルギーに転換して効率よく送液できる。この圧力転換を渦巻室で行うことから渦巻ポンプと呼ばれる。排水量が固定しないが、むしろ圧力を増大することで流体の流れを起こす。

渦巻ポンプの種類には、羽根車が1枚の単段渦巻ポンプと2枚以上の多段渦巻ポンプがある。前者は比較的揚程が低いときに用いられる。揚程が高く羽根車1枚で圧力が十分与えられないときに、羽根車を2枚以上に増やした後者の多段ポンプが用いられる。このように渦巻ポンプは羽根車の段数を増やすことによって揚程の大きさに対応して柔軟に選択できる。

以下では ESP を設置した坑井の構造および圧力勾配の概要とポンプ採取の原理について説明する⁶⁾。

8.2.1 水中電動ポンプ採取井の構造および圧力勾配の概要

図-8.7 は典型的な ESP を設置した坑井の構造とポンプ運転時における圧力勾配の概念を示す。ポンプと電動モータは図-8.7 (a) のようにチュービングに吊された状態で貯留層よりも上方の水中に設置される。電動モータはケーブルで地上の 3 相交流電源に接続される。

液体の汲み上げは電動モータを作動し、流動坑底圧力を低下させることによって行われる。電動モータは水中にあるため周りを流れる坑内流体によって冷却される。

ESP の主な特徴は、① 高流量の流体を生産できること、② 深い深度の坑井に用いられること、③ 汲み上げる過程でアニュラス内の遊離ガスを除去できることである。

ポンプ運転時における坑内の圧力は、図-8.7 (b) にみられるようにポンプ下方の吸込圧力 (suction pressure) p_{suc} が低下し、同時に流動坑底圧力 (flowing bottom hole pressure) p_{wf} が平均貯留層圧力 (average reservoir pressure) \bar{p} よりも低下するため、一定流量 q の地層水がポンプに流入する。流入した地層水はポンプの高い吐出圧力 (discharge pressure) p_{dis} によりチュービング内を上方に押し上げられ、地表フローラインへ送られる。一方、ケーシング内の圧力は初期の静止圧力よりも

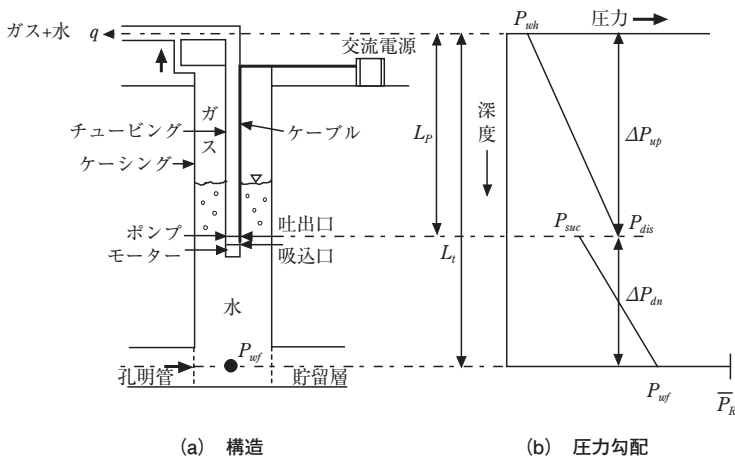


図-8.7 ポンプ採取井の構造と運転時における圧力勾配の概念

著者略歴

秋林 智 (あきばやしさとし)

1965年 秋田大学鉱山学部採鉱学科卒業
1968年 秋田大学助手
1979年 秋田大学講師
1982年 工学博士
秋田大学助教授
1990年 秋田大学教授
現在 秋田大学名誉教授

水溶性天然ガス 生産システムの挙動解析

定価はカバーに表示してあります。

2015年2月10日 1版1刷発行

ISBN 978-4-7655-1819-2 C3051

著者 秋 林 智

発行者 長 滋 彦

発行所 技報堂出版株式会社

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-2-5

電 話 営 業 (03) (5217) 0885

編 集 (03) (5217) 0881

F A X (03) (5217) 0886

振替口座 00140-4-10

U R L <http://gihodobooks.jp/>

日本書籍出版協会会員
自然科学書協会会員
土木・建築書協会会員

Printed in Japan

© Satoshi Akibayashi, 2015

装丁 ジンキッズ 印刷・製本 愛甲社

落丁・乱丁はお取り替えます。

JCOPY <(社)出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に、(社)出版者著作権管理機構(電話:03-3513-6969, FAX:03-3513-6979, E-mail:info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。