

地熱貯留層管理のための貯留層並びに
坑井内のモデリング技術に関する研究

Study on Modeling of Reservoir and Wellbore
for Geothermal Reservoir Management

2003年3月

加藤 久遠

目 次

第1章 緒論	1
1.1 地熱開発の諸問題	1
1.2 地熱資源の特性	2
(1) 地熱資源の分布	2
(2) 地熱資源の賦存形態	2
(3) 地熱資源の発電利用におけるライフサイクル	3
1.3 これまでの研究とそれらの問題点	5
(1) 貯留層管理	5
(2) スケール問題	7
スケール問題の概要	7
生産井坑内のスケール	8
(3) 貯留層モデル	9
モデル概要	9
ランプトパラメータモデル	10
分布パラメータモデル	11
(4) 従来の問題点	12
1.4 本研究の目的とここで取り扱うテーマ	12
(1) 本研究の目的	12
(2) 取り扱うテーマの概要	13
第2章 澄川地熱地域の概要	23
2.1 緒言	23
2.2 澄川地熱地域の概要	23
2.3 澄川地熱発電所の運転履歴	24
2.4 澄川貯留層の特性	25
(1) 貯留構造	25
地質層序と地質構造	25
断裂系	26
(2) 熱構造	27
地層平衡温度	27
変質鉱物の分布	28
(3) 水理構造	29
貯留層圧力の分布	29
透水性構造	29
流体流動	30

2.5	結言	33
第3章 硬石膏スケール生成メカニズムの解析とスケール成長に伴う噴出挙動の予測		
	測	55
3.1	緒言	55
3.2	生産井 SC-1 坑の生産履歴	56
3.3	スケールの分析結果	57
3.4	坑内調査結果	59
	(1) 検層結果	59
	(2) 坑内状況の経年変化と硬石膏スケールの沈殿	60
	(3) スケール沈殿量の解析	61
3.5	化学平衡論に基づくスケール生成のメカニズム	62
	(1) 澄川地熱流体の硬石膏飽和度指数	62
	(2) 混合 - 沸騰モデルにおける硬石膏飽和度	63
	混合モデル	63
	沸騰モデル	64
3.6	速度論に基づくスケール成長と噴出挙動の予測	65
	(1) モデル作成	65
	数学モデル	65
	計算アルゴリズム	67
	(2) 解析	68
	入力パラメータの検討	68
	ヒストリーマッチング	70
	将来予測	72
	(3) 考察	73
3.7	結言	74
第4章 ランプトパラメータモデルによる生産 - 還元メカニズムの解析		
4.1	緒言	95
4.2	生産 - 還元システムの概要	96
4.3	地化学モニタリング	96
	(1) 地化学モニタリング結果	96
	SB-1 坑	97
	S-4 坑	97
	SC-1 坑	97
	(2) Cl 濃度と SO ₄ 濃度の関係	98
4.4	蒸気復水の化学的及び同位体的性質	98

4.4	トレーサテスト結果	99
4.5	ランプトパラメータモデルの構築	99
	(1) ランプトパラメータモデルの作成	99
	(2) 数学モデル	100
	化学成分および流体に関する質量保存の式	100
	エネルギー保存の式	102
	(3) 入力変数と未知変数	103
4.6	計算結果	104
	(1) SB-1 坑	104
	(2) SC-1 坑	104
	(3) S-4 坑	104
	(4) 感度解析	105
4.7	考察	106
	(1) トレーサテストとの比較	106
	(2) 還元流体の生産領域への還流	107
	(3) 生産タンクの容量	108
	(4) 還元流体によるエネルギー回収	108
4.9	結言	109
第5章 貯留層モデルによる生産予測シミュレーション		126
5.1	緒言	126
5.2	解析条件	127
	(1) 計算領域とグリッド間隔	127
	(2) 岩石物性	127
	(3) 境界条件とソース・シンク	129
	境界条件	129
	質量及び熱の流入 / 流出条件	129
5.3	自然状態シミュレーション	130
	(1) 初期条件、計算時間と最大時間ステップ	130
	(2) 計算結果	131
	総エネルギー、流体質量、及び蒸気容積の経年変化	131
	坑内温度のマッチング	131
	貯留層圧力のマッチング	131
	温度、圧力、二相領域の分布	132
5.4	ヒストリーマッチング	132
	(1) フラクチャーパラメータ	132
	(2) 初期条件	133

(3) 解析期間と時間ステップ.....	133
(4) 計算結果.....	133
Cl 濃度のマッチング.....	133
噴出エンタルピーのマッチング.....	134
貯留層圧力のマッチング.....	135
重力変動のマッチング.....	136
鉛直方向の絶対浸透率.....	137
貯留層内沸騰過程.....	138
コールドスウィープ過程.....	140
5.5 生産予測シミュレーション.....	141
(1) 解析条件.....	141
(2) 発電出力、噴出流量、噴出エンタルピー及び Cl 濃度の予測	141
(3) 温度、圧力、二相領域の分布.....	142
5.6 貯留層管理の課題.....	142
5.7 結言.....	144
第6章 結論.....	169
6.1 まとめ.....	169
6.2 今後の課題.....	173
(1) 坑井内モデル.....	173
(2) ランプトパラメータモデル.....	173
(3) 分布パラメータモデル.....	173
謝辞.....	175
文献.....	177

図表一覧

第 1 章

図 1.1	わが国の地熱発電容量と実績発電量の推移(日本地熱調査会 ,2002)	15
図 1.2	地熱貯留層の概念図(石戸 ,1990)	16
図 1.3	3種類の資源のライフサイクル(花野 ,2000)	17
図 1.4	地熱資源のライフサイクル (花野 , 2000)	17
図 1.5	蒸気生産量減衰のメカニズム (花野 , 1995a)	18
図 1.6	坑井内スケールの研究事例 . [A]Ajima et al.(1998) によるスメクタイトスケールの坑井内状況 . [B]Granbakken et al.(1991)による BaSO ₄ スケールの実測値 (+印) と計算結果 (曲線) のマッチング .	19
図 1.7	貯留層シミュレーションの手順	20
図 1.8	ランプトパラメータモデルの解析事例 (Whiting and Ramey, 1969) . [A]ランプトパラメータモデルの概念図 . [B]貯留層圧力の計算結果と実測値のマッチング結果	21
図 1.9	分布パラメータモデルの解析事例 (Amistoso et al., 1993) . [A]グリッド分割図 . [B]Cl 濃度の計算値と実測値のマッチング結果 .	22

第 2 章

図 2.1	澄川地域の坑井配置図	35
図 2.2	澄川地域の概念モデル (南北断面) (窪田 (1985) を修正)	36
図 2.3	澄川生産井の噴出流量と比エンタルピーの関係	37
図 2.4	澄川地熱発電所の生産履歴 (総流量、総エンタルピー、発電電力)	38
図 2.5	八幡平火山地帯の広域構造図	39
図 2.6	模式地質柱状図	40
図 2.7	地質図 (標高 0mASL)	41
図 2.8	仮想基盤変位法を用いた解析結果 (安藤ほか , 1985)	42
図 2.9	澄川坑井の地層平衡温度	43
図 2.10	SA-1 坑の変質分布、地層平衡温度、及び流体包有物均質化温度 (番場・窪田 , 1997)	44
図 2.11	変質分帯と変質鉱物の出現消滅 (番場・窪田 , 1997)	45
図 2.12	標高 - フィードポイント圧力図	46
図 2.13	注水指数の平面分布	47
図 2.14	圧力干渉試験に基づく浸透率層厚積の平面分布	48
図 2.15	トレーサテスト結果	49
図 2.16	Cl 濃度 - エンタルピー図 (生産開始前)	50
図 2.17	生産開始前と生産開始後の Cl 濃度 - エンタルピーの関係の比較 .	

[A]SA-4 坑 [B]SC-1 坑	52
図 2.18 ガス濃度と貯留層内沸騰過程	53
図 2.19 岩石及び熱水の Sr 同位体比の関係	54
図 2.20 SC-1 坑及び SC-2 坑の熱水の Sr 同位体比の経年変化	
第 3 章	
図 3.1 SC-1 坑の静止状態の坑井内温度分布図	76
図 3.2 SC-1 坑の生産履歴(蒸気流量、熱水流量、総流量、坑口圧力の経年変化)	77
図 3.3 坑口圧力と総噴出流量の関係	78
図 3.4 シリカ温度、エンタルピー温度、蒸気流入率 (IVF) の経年変化 . IVF は本文参照 . 併せて流体包有物均質化温度 (T-h) も示す	79
図 3.5 スケールの実体顕微鏡観察結果[1]と薄片観察結果[2]	80
図 3.6 スケールの粉末 X 線回折チャート	80
図 3.7 SC-1 坑熱水と硬石膏との Sr 分配係数 . Shikazono and Holland (1983) の実験データと東太平洋海膨のチムニーの値を併せて示す	81
図 3.8 硬石膏中の流体包有物の顕微鏡写真	81
図 3.9 噴気中の温度、圧力、及びスピナーの分布 (2000 年 10 月 3 日) . 印は、フィードポイントを示す	82
図 3.10 キャリパー (坑径) 検層結果 (2000 年 9 月 16 日) . [A]はスケール沈殿の全区間を、[B]は 7"ケーシング内の拡大をそれぞれ示す	83
図 3.11 スケールの沈殿状況とフィードポイントの経年変化の概念図	84
図 3.12 澄川地熱流体の硬石膏の過飽和度	85
図 3.13 SC-1 坑井内で生じる物理過程の概念図 . 低温流体と高温流体の混合の後、浅部で沸騰が起こる	85
図 3.14 混合比に対する流体温度と硬石膏過飽和度指数の変化 (混合モデルの計算結果) . Case1 は他坑井データを使用し、Case2 は修正された SC-1 坑データを使用した場合を意味する . 陰影部は、実測された SC-1 坑の値の範囲を示す	86
図 3.15 硬石膏の溶解度と、250 と 300 で硬石膏に飽和した熱水の混合流体の $[Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$ 活動度積の関係	86
図 3.16 フラッシュポイント以浅の坑井内温度分布 [A] と硬石膏過飽和度の分布 [B] (沸騰モデル計算結果)	87
図 3.17 坑井内のスケール沈殿のモデルの概念図	88
図 3.18 シミュレーションのフローチャート	89
図 3.19 実測値と計算結果とのヒストリーマッチング結果 ([A]:2年後のスケール層厚, [B]:噴出流量)	90
図 3.20 4 年間の将来予測結果 . [A]: 蒸気流量 ; [B]: 熱水流量 ; [C]: 坑口圧力	

	(WHP); [D]: スケール層厚.....	91
図 3.21	過飽和度 ($C-C_{eq}$) と坑井内流速 (u) をパラメータとしたスケール層厚に対する感度解析結果. 横軸は 1998 年 10 月のデータ ($C-C_{eq}$ と u) で規格化された値を、また、縦軸は同データで求められたスケール層厚 (d) で規格された値を示す .	92
表 3.1	スケールの化学分析結果.....	93
表 3.2	SC-1 坑熱水の化学分析結果(大気圧状態).....	93
表 3.3	ヒストリーマッチング及び将来予測で用いた入力パラメータの一覧.....	94

第 4 章

図 4.1	澄川地熱発電所の生産 - 還元系統.....	111
図 4.2	SB-1 坑、S-4 坑、及び SC-1 坑の Cl 濃度、 SO_4 濃度、 D 、及び石英温度計温度($T-SiO_2$)の経年変化.....	112
図 4.3	生産流体及び還元流体の Cl 濃度及び SO_4 濃度の関係. 矢印は、時間経過の方向を示す .	113
図 4.4	生産流体、分離熱水及び蒸気復水の Cl 濃度と D の関係.....	114
図 4.5	総蒸気流量と蒸気復水還元流量、並びに気温の季節変動.....	115
図 4.6	蒸気復水と 2 種類の分離熱水の還元を考慮した生産 - 還元を表すランプトパラメータモデル.....	116
図 4.7	ランプトパラメータモデルで設定される還元領域の位置図.....	117
図 4.8	実測値 () 計算結果 (実線) とのマッチング (SB-1 坑)	118
図 4.9	実測値 () 計算結果 (実線) とのマッチング (SC-1 坑)	119
図 4.10	実測値 () 計算結果 (実線) とのマッチング (S-4 坑). [A]は解析期間の前半を、[B]はその後半を示す .	120
図 4.11	2 組の未知変数における規格化残差二乗和(NS)の分布 (S-4 坑 [A])	121
図 4.12	規格化残差二乗和と未知変数 (f_1 , f_2 , f_3 , W) の関係.....	122
図 4.13	各坑井に対する還流率のまとめ A 及び(a)は S-4 坑の解析期間の前半を、B 及び(b)は S-4 坑の解析期間の後半を示す .	123
図 4.14	各坑井に対する混入率のまとめ A 及び(a)は S-4 坑の解析期間の前半を、B 及び(b)は S-4 坑の解析期間の後半を示す .	124
表 4.1	解析で使用する入力変数の一覧.....	125
表 4.2	推定された未知変数の一覧.....	125

第 5 章

図 5.1	計算領域とグリッド分割	146
図 5.2	南北断面における岩石分割.....	147
図 5.3	自然状態シミュレーションにおける総エネルギー [A]、流体質量 [B]、及	

	び蒸気容積[C]の経年変化	148
図 5.4	坑井内温度における実測値と計算結果のマッチング結果	149
図 5.5	フィードポイント圧力における実測値と計算結果のマッチング結果	150
図 5.6	温度、圧力、二相領域、及び流束の分布 [自然状態シミュレーション結果] (赤線 : 温度、青線 : 圧力、緑領域 : 二相領域、矢印 : 流束)	151
図 5.7	生産流体の Cl 濃度の実測値と計算結果のマッチング	152
図 5.8	生産流体の比エンタルピーの実測値と計算結果のマッチング	153
図 5.9	貯留層圧力の実測値と計算結果のマッチング (KY-1 坑及び SN-8R 坑)	154
図 5.10	1994 年から 1995 年における重力変動の計算結果[A]と、実測値(Sugihara and Ishido, 1998) [B] の比較 . 陰影部は正異常部を示す .	155
図 5.11	AA3 層及び MV3 層の鉛直方向の浸透率をパラメータとした S-4 坑及び KY-1 坑における圧力干渉試験の感度解析	156
図 5.12	AA3 層及び MV3 層の鉛直方向の浸透率をパラメータとした Cl 濃度変化の感度解析 . [A] 及び [B] は、それぞれ深部及び浅部のフィードポイントの違いを示す .	157
図 5.13	AA3 層及び MV3 層の鉛直方向の浸透率をパラメータとした重力変動の感度解析 . [A] 及び [B] は、それぞれ生産領域及び還元領域の違いを示す .	158
図 5.14	マトリックス部の絶対浸透率 (k_m) とフラクチャースペーシング () をパラメータとした比エンタルピーの感度解析 (SA-4 坑)	159
図 5.15	SA-1 坑及び SA-4 坑の生産ブロックにおけるフラクチャーゾーンとマトリックス部 (中心部) における温度、圧力及び蒸気飽和度の経時変化	160
図 5.16	フラクチャースペーシング () をパラメータとした SB-1 坑の比エンタルピーの感度解析	161
図 5.17	SE-2 へ投入したトレーサ(I)の SB-1 坑への応答の解析結果	161
図 5.18	生産予測シミュレーション結果 (発電出力、噴出流量、比エンタルピー、Cl 濃度の経年変化)	162
図 5.19	生産開始前と 17 年後の貯留層の温度、圧力、二相領域、及び流束分布の比較 (赤線 : 温度、青線 : 圧力、緑領域 : 二相領域、矢印 : 流束)	163
表 5.1	岩石物性値の一覧	164
表 5.2	境界条件の一覧	165
表 5.3	フラクチャーパラメータの一覧	166
表 5.4	生産予測シミュレーションの解析条件	167
表 5.5	生産井、及び還元井の座標、並びに生産指数 (Vstar) の一覧	168

