

初め北西から南東方向であったのに対し、現在では南東から北東の反対方向に流動方向が変化していることがわかる。地化学調査において、シリカ濃度と CL 濃度の変化から流体の起源割合が経年的に深部熱水に比べて地表水（温泉水）の割合が大きくなっており、これより浅部貯留層の周囲から貯留層に地表水が流入していることが推定されている。数値計算により算出された流体流動の経年的な変化は、地化学調査により推定された結果と調和的である。

また、同深度の貯留層圧力の経年変化を図 2-8-39 に示す。本図から地域の中央で圧力が経年的に低下していることがわかる。

計算結果における貯留層温度・圧力の経年的な低下は、実際の南部の井戸の噴気停止や地表の地熱兆候が消失した現象を再現していると考えられる。

流入点のブロックの温度と地化学温度(シリカ濃度から推定される温度)のマッチング結果を図 2-8-40 に示す。本地域の浅部井の流入点は上述の通り不詳であるため、流入点ブロックの温度と実際の地化学温度の比較対象深度が異なる可能性がある。ただし、数値計算の流入点ブロックも実際の流入点も浅部貯留層であるため、ここでは両者が比較できるものと考えた。以上を踏まえた上で、数値計算の計算結果と地化学温度を比較すると、概ね両者は調和的であると言える。深部井 ZK4001 については、静止中の温度検層結果における低温度異常より流入点が推定されているため信頼度が高い。ZK4001 の計算結果の温度と地化学温度を比較すると、両者はよくマッチングしている。従って、ヒストリーマッチングにおいても貯留層シミュレーションの流入点付近の温度は実際の貯留層温度を概ね再現していると言える。

以上のマッチング結果より、本数値モデルは現状の羊八井地域の貯留層を概ね再現していると言える。従って、後に実施する生産予測シミュレーションの結果も概ね信頼できると考えられる。

今後、より精度の高く信頼性のある数値モデルとするためには、新たに各坑井や発電所での蒸気流量・熱水量を測定すること、静止中の坑井内温度圧力測定を実施すること、貯留層の圧力モニタリングを実施すること、生産される地熱流体の地化学モニタリングを実施し、その結果と計算結果がマッチングするように数値モデルを改善していくことが望まれる。

2-8-5 将来予測および地熱資源量評価

ここでは生産予測シミュレーションを行い、各生産井の蒸気生産量の変化を通じて貯留層の生産能力の評価を行うものである。従って、具体的な各生産井の破損や塞がりなどの坑井寿命は無視した計算である。またここで示す各生産井の生産の継続が適切だと述べているものではない。この点注意をしていただきたい。

(i) 条件設定

生産予測シミュレーションは、2006年3月から2036年3月までの30年間について実施した。各坑井の噴出流量(蒸気流量+熱水流量)は、ヒストリーマッチングが終了した2006年3月時点の噴出流量で一定であるものとした。実際は生産に伴い貯留層圧力・温度が低下するため、時間が経つとともに噴出流量は減衰する。しかし、後述の現状維持のケース、ZK4001を追加したケースあるいは蒸気流量200t/hを維持するケ

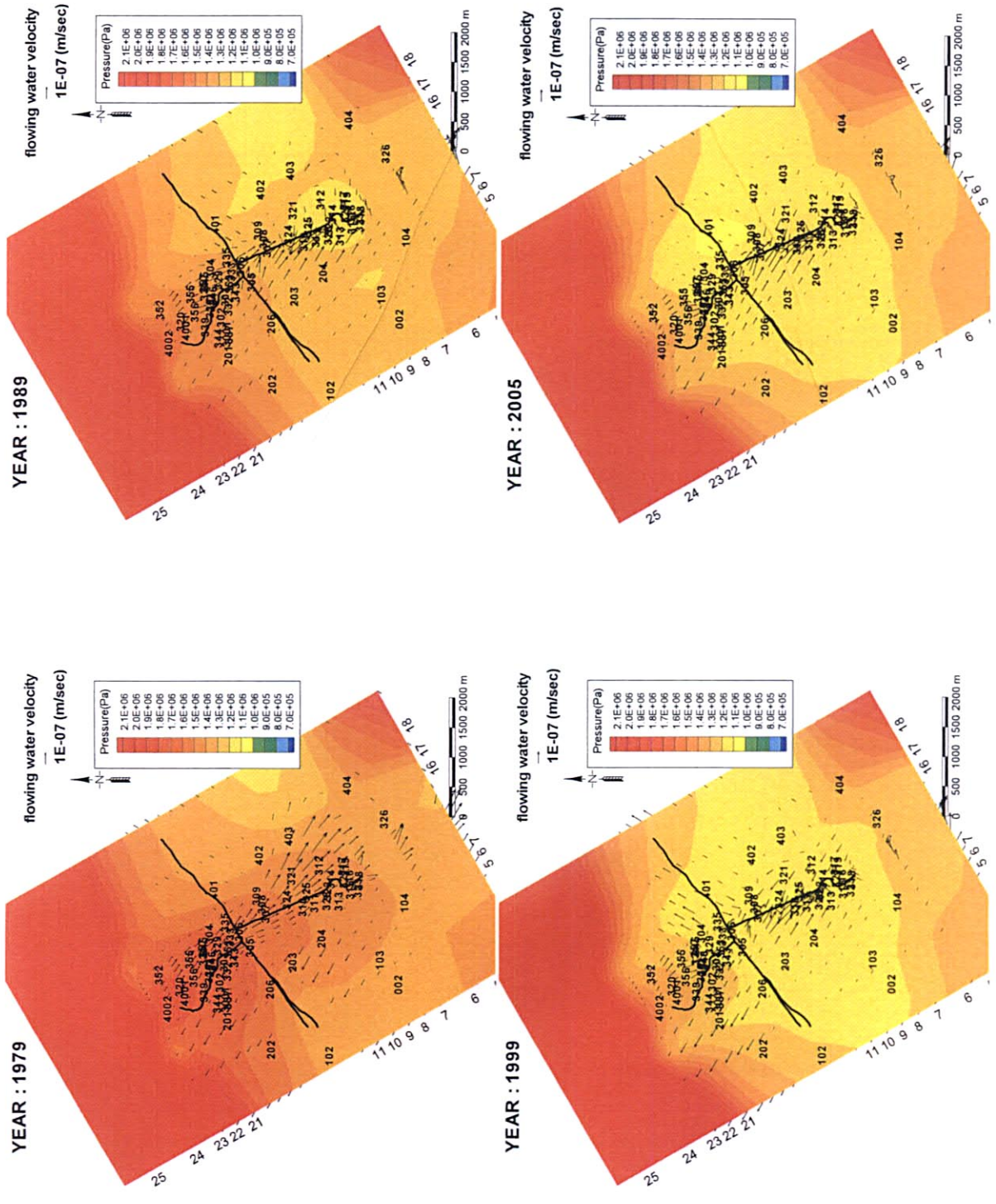


図2-8-39 ヒストリーマッチングにおける貯留層圧力分布の経時変化(第3層:海拔4150 ~ 4200m)

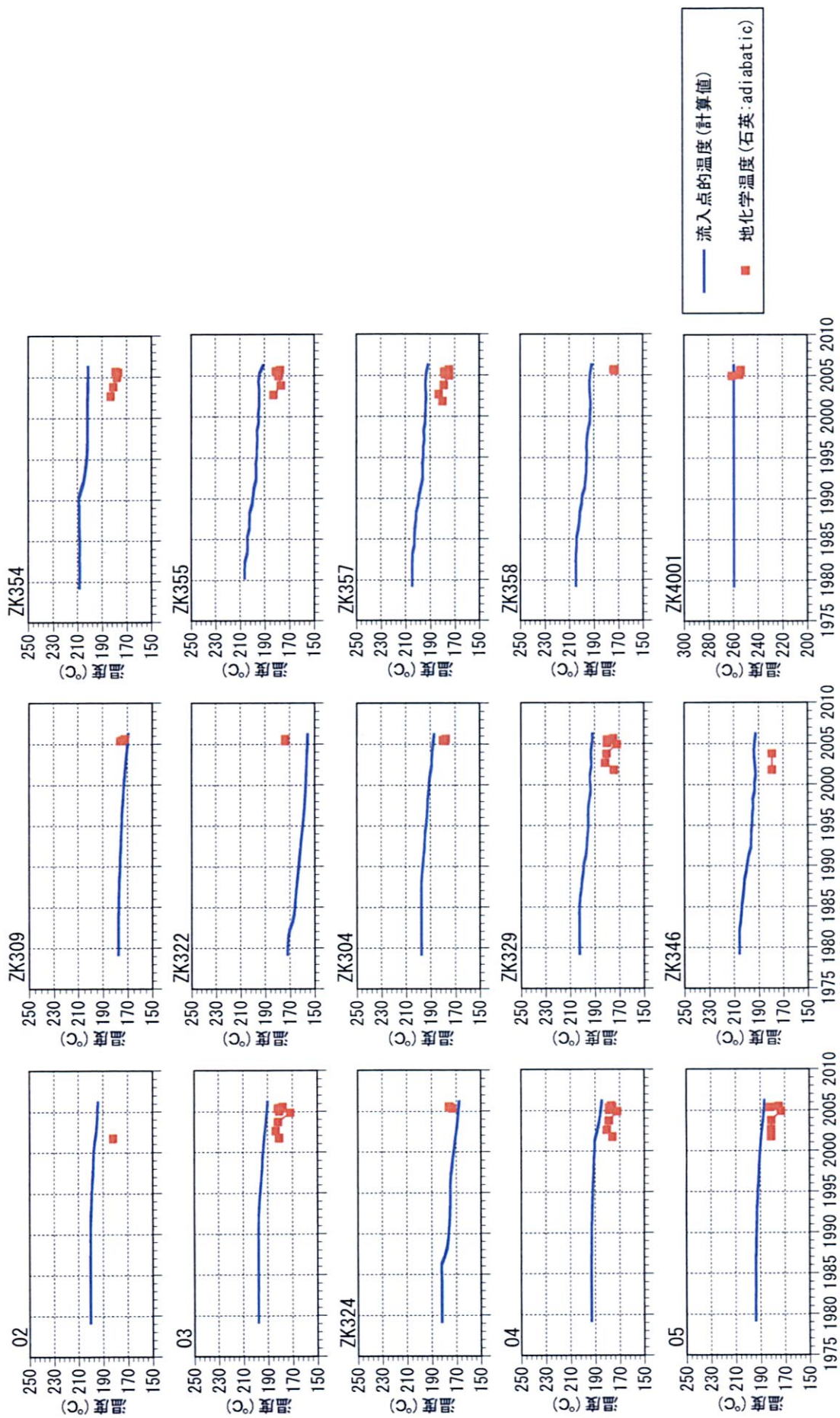


図 2-8-40 流入点温度の経時変化 (計算結果と地化学温度の比較)

ースにおいて、貯留層圧力・温度に著しい低下が見られないため、本設定は特に問題がないと考える。ただし、蒸気流量 240t/h あるいは 280t/h を維持するケースにおいて流入点の温度・圧力が著しく低下する場合には、実際の噴出流量は大きく減衰する。従って、噴出流量を一定とした予測計算結果は実際に比べて楽観的な評価になるので注意する必要がある。

生産予測の設定は、還元の有無により 2 段階に分けて計算を実施した。段階Ⅰでは、還元を実施せずに生産蒸気流量を変えた 5 通りのケース(ケースⅠ-1~5)を計算した。段階Ⅱでは、段階Ⅰで評価された貯留層の能力から最も将来開発するのに妥当と考えた蒸気流量のケース(蒸気流量 200t/h のケース)において、噴出した熱水を全て還元したときの生産挙動を予測した。ここでは、還元井の最適の位置を調べる目的で還元井の位置を変えた 3 通り(Ⅱ-1~3)を計算した。

(1) 還元なしの生産予測シミュレーション(段階Ⅰ)の条件設定

計算したケースは表 2-8-3 に示すように、①現在稼動している浅部生産井のみで補充生産井を追加しないケース、②現在稼動している浅部生産井に深部の ZK4001 を 2006 年 3 月から追加し、それ以後は補充生産井を追加しないケース、③総蒸気流量が 200t/h を下回らないように、深部に補充井を適時追加するケース、④総蒸気流量が 240t/h を下回らないように、深部に補充井を適時追加するケース、⑤総蒸気流量が 280t/h を下回らないように、深部に補充井を適時追加するケースの 5 ケースである。

深部補充井を追加する位置は深部貯留層であり、全て異なるブロックとした。また、生産井間の距離をできるだけ大きくとるように設定した。深部補充井の位置と順番を図 2-8-4 1 に示す。

深部補充生産井は、貯留層の温度や圧力の低下のために総蒸気生産量が設定した蒸気流量を下回る時期に追加した。また、深部補充井の流入点の位置は、深部貯留層で ZK4001 と異なるブロックとした。ケースによっては、流入点のブロックの温度または圧力が低下するため、蒸気ラインに合流できなくなることが考えられる。坑井内流動シミュレーションの計算結果から、浅部井では流入点のブロックの圧力が 0.6MPa、温度が 140℃を下回ったとき生産を停止するように設定した。

(2) 還元ありの生産予測シミュレーション(段階Ⅱ)の条件設定

還元を実施したケースの蒸気流量は、後述する計算結果から本貯留層の能力を考慮して最も妥当と考えられた総蒸気流量 200t/h を下回らないケースについて実施した。ここでも、上記の設定と同様に、総蒸気流量が 200t/h を下回る時期に深部補充井を追加した。

最適な還元位置を評価する目的で還元井の位置を図 2-8-4 2 に示すように地域の北部、中央部、南部の 3 通りの場合(表 2-8-4)について計算を行った。

浅部井の熱水は図 2-8-4 3 に示すように、還元池に一旦落として大気圧開放した後に還元するように設定した。このときの還元流体の温度は 40℃と設定した。一方、深部井の熱水は図 2-8-4 4 に示すようにセパレータで分離した後の熱水全量をクローズド還元する場合を考えた。このときの還元流体の温度は、セパレータ圧 7.0kg/cm²G の飽和温度 164℃より若干温度が低下した 160℃と設定した。

表 2-8-3 還元をしない生産予測シミュレーションの設定・結果一覧

	ケース I-1	ケース I-2	ケース I-3	ケース I-4	ケース I-5
将来予測期間		2006 年 3 月～2036 年 3 月 (30 年間)			
補充井追加位置		ZK4001 と同じ深部貯留層の異なるブロック			
補充井追加時期		必要最低蒸気量を下回らないように適時追加			
必要最低蒸気流量(t/h)	現状維持	現状維持+ZK4001 200	240	280	
ライン圧力 (kg/cm ² G)	1.7(1・2号機)	1.7(1・2号機) 7.0(3号機)	1.7(1・2号機) 7.0(3号機)	1.7(1・2号機) 7.0(3号機)	1.7(1・2号機) 7.0(3号機)
現在の生産井数 (2005 年)		33 (現在:13 本)			
追加補充井数	0	1 (ZK4001)	2	7	9
2006 年の蒸気流量 (浅部:深部, t/h)	167	220 (167:53)	220 (167:53)	247 (167:80)	301 (167:134)
2036 年の蒸気流量 (浅部:深部, t/h)	146	187 (143:44)	197 (132:65)	249 (49:200)	289 (41:248)
2036 年の坑井数	13	14	12	11	13
開発の可能性	十分ある	十分ある	十分ある	可能性はあるが、開発 リスクが大い	開発リスクが非常に大 きく、実現が困難

no.	坑井名	位置			備考
		I	J	K	
1	4(324)	12	11	3	生産中
2	9(309)	14	12	5	生産中
3	"04"	14	15	4	生産中
4	"05"	13	16	5	生産中
5	13	14	17	3	生産中
6	357	12	18	3	生産中
7	355	12	19	3	生産中
8	329(12)	11	16	3	生産中
9	358	11	17	3	生産中
10	354	9	18	4	生産中
11	359	9	17	4	生産中
12	302	7	18	5	生産中
13	"03"	7	16	4	生産中
14	4001	8	20	11	深部補充井 1
15	4003	5	20	11	深部補充井 2
16	4004	13	20	11	深部補充井 3
17	4005	6	18	13	深部補充井 4
18	4006	9	18	13	深部補充井 5
19	4007	7	19	13	深部補充井 6
20	4008	10	20	11	深部補充井 7
21	4009	7	22	10	深部補充井 8
22	4010	9	22	10	深部補充井 9

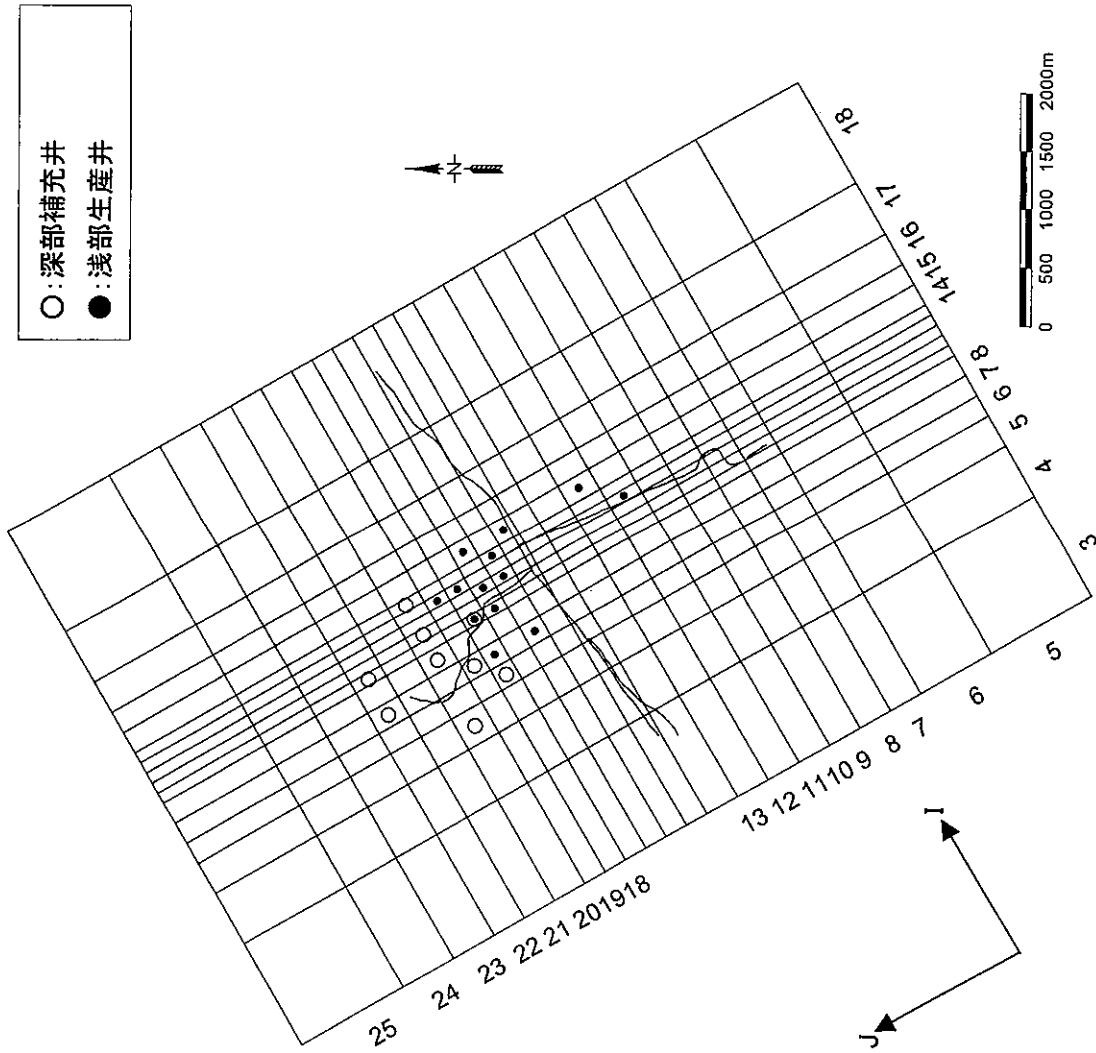
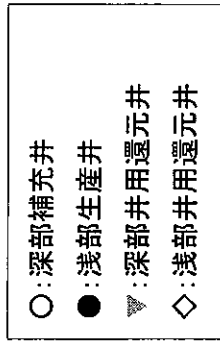


図 2-8-41 生産予測シミュレーション(還元なし)における深部井の追加位置と順番



no.	坑井名	位置			備考
		I	J	K	
1	4(324)	12	11	3	生産中
2	9(309)	14	12	5	生産中
3	"04"	14	15	4	生産中
4	"05"	13	16	5	生産中
5	13	14	17	3	生産中
6	357	12	18	3	生産中
7	355	12	19	3	生産中
8	329(12)	11	16	3	生産中
9	358	11	17	3	生産中
10	354	9	18	4	生産中
11	359	9	17	4	生産中
12	302	7	18	5	生産中
13	"03"	7	16	4	生産中
14	4001	8	20	11	深部補充井1
15	4003	5	20	11	深部補充井2
16	4004	13	20	11	深部補充井3
17	NR01	9	20	3	北部還元井1
18	NR02	6	20	3	北部還元井2
19	NR03	12	20	3	北部還元井3
20	GR01	11	13	4	中央部還元井1
21	GR02	8	13	4	中央部還元井2
22	GR03	12	11	4	中央部還元井3
23	SR01	9	10	3	北部還元井1
24	SR02	12	10	3	北部還元井2
25	SR03	14	10	3	北部還元井3
26	23	8	8	4	浅部井用還元井
27	11	9	9	3	浅部井用還元井
28	老10	10	9	3	浅部井用還元井
29	18	12	7	4	浅部井用還元井
30	6	12	8	4	浅部井用還元井
31	老12	14	8	4	浅部井用還元井

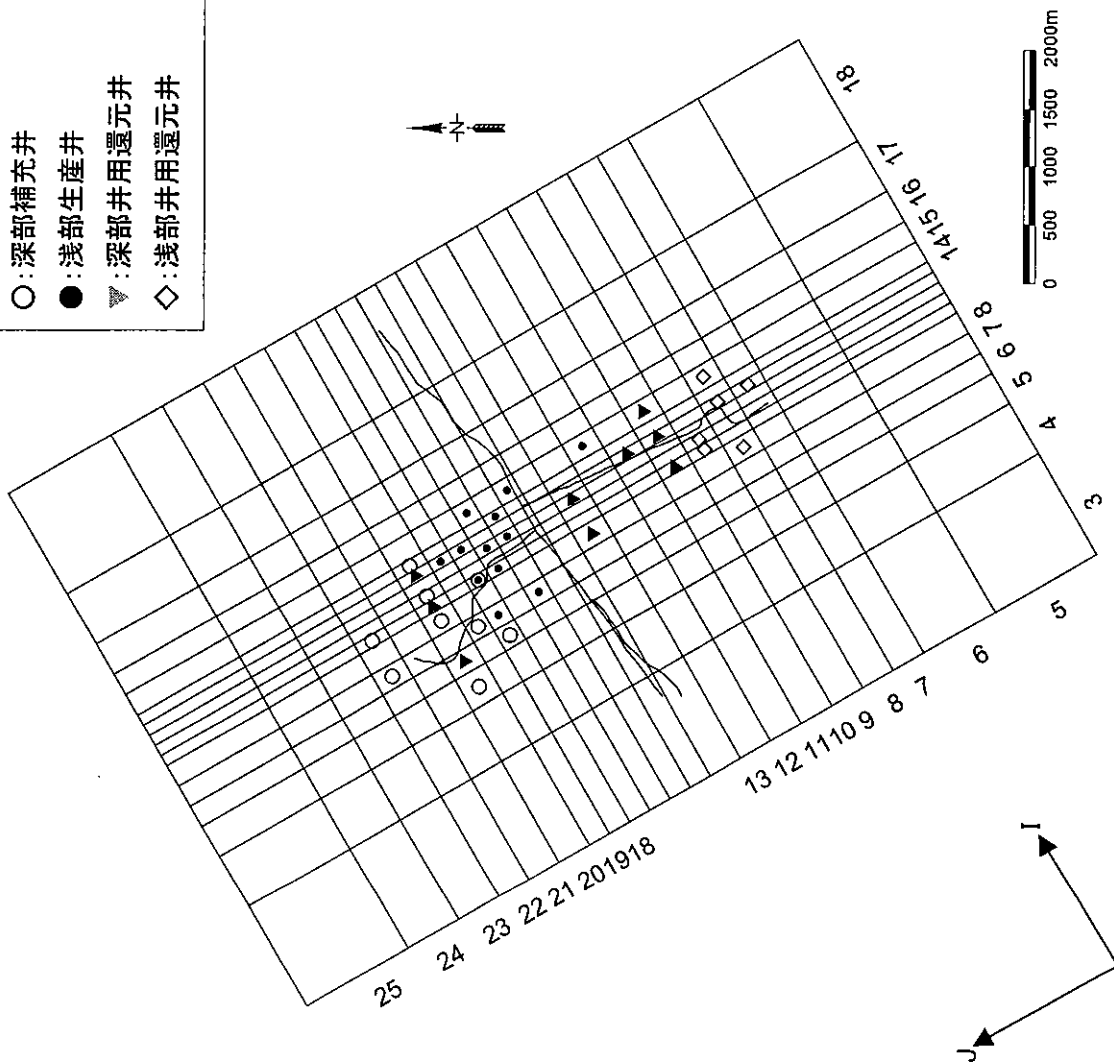


図 2-8-42 生産予測シミュレーション(還元あり)における還元井の追加位置と順番

表 2-8-4 還元をする生産予測シミュレーションの設定・結果一覧

	ケース I-1	ケース I-2	ケース I-3
将来予測期間	2006年3月～2036年3月(30年間)		
補充井追加位置	ZK4001と同じ深部貯留層の異なるブロック		
補充井追加時期	必要最低蒸気量を下回らないように適時追加		
還元井の流出点	南部(1号機周辺)の昔の生産井の流入点		
還元流体温度	40℃		
浅部井の熱水	ZK23(ZK313) 70kg/s 18(ZK319) 50kg/s 6(ZK314) 50kg/s 12 70kg/s 11(ZK328) 50kg/s 10(322) 25kg/s		
深部井の熱水	北部(ZK4001 周辺) 浅部貯留層(海拔 4,150～4,200m)	中央部(4号井周辺) 浅部貯留層(海拔 4,150～4,200m)	南部(1号機周辺) 浅部貯留層(海拔 4,150～4,200m)
還元流体温度	160℃		
還元流量	1本につき 215t/h		
必要最低蒸気流量(t/h)	200		
ライン圧力(kg/cm ² G)	1.7(1・2号機) 7.0(3号機)		
現在の生産井数(2005年)	33(現在:13本)		
追加補充井数	3	3	3
補充井の追加時期	ZK4001(2006年) ZK4003(2017年) ZK4004(2026年)	ZK4001(2006年) ZK4003(2017年) ZK4004(2026年)	ZK4001(2006年) ZK4003(2017年) ZK4004(2031年)
2006年の蒸気流量 (浅部:深部, t/h)	220 (167:53)	220 (167:53)	220 (167:53)
2036年の蒸気流量 (浅部:深部, t/h)	201 (120:81)	201 (120:81)	197 (132:65)
2036年の坑井数	16	16	16
開発の可能性	十分ある	十分ある	十分ある

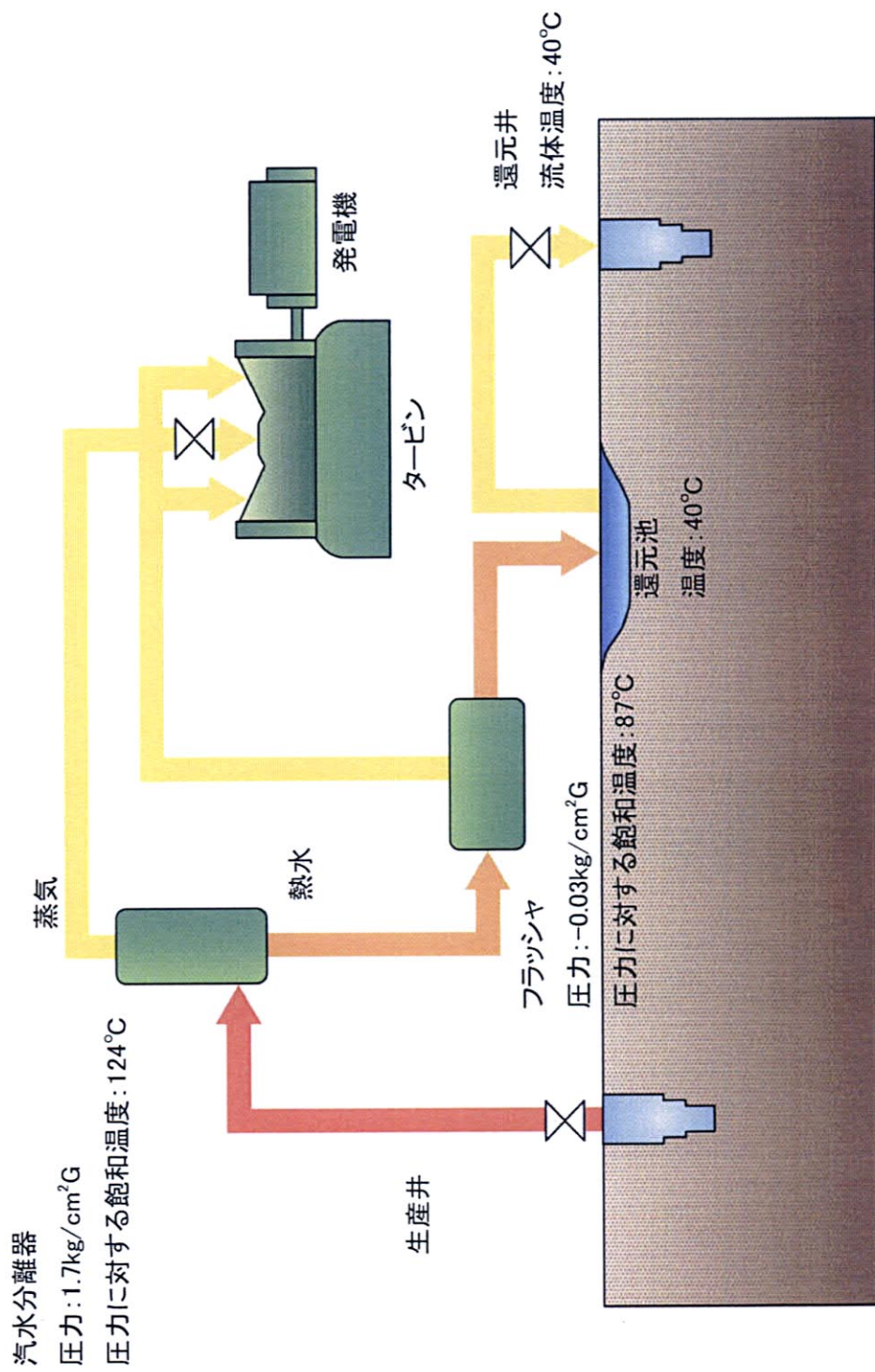


図 2-8-43 浅部生産井の熱水の還元模式図

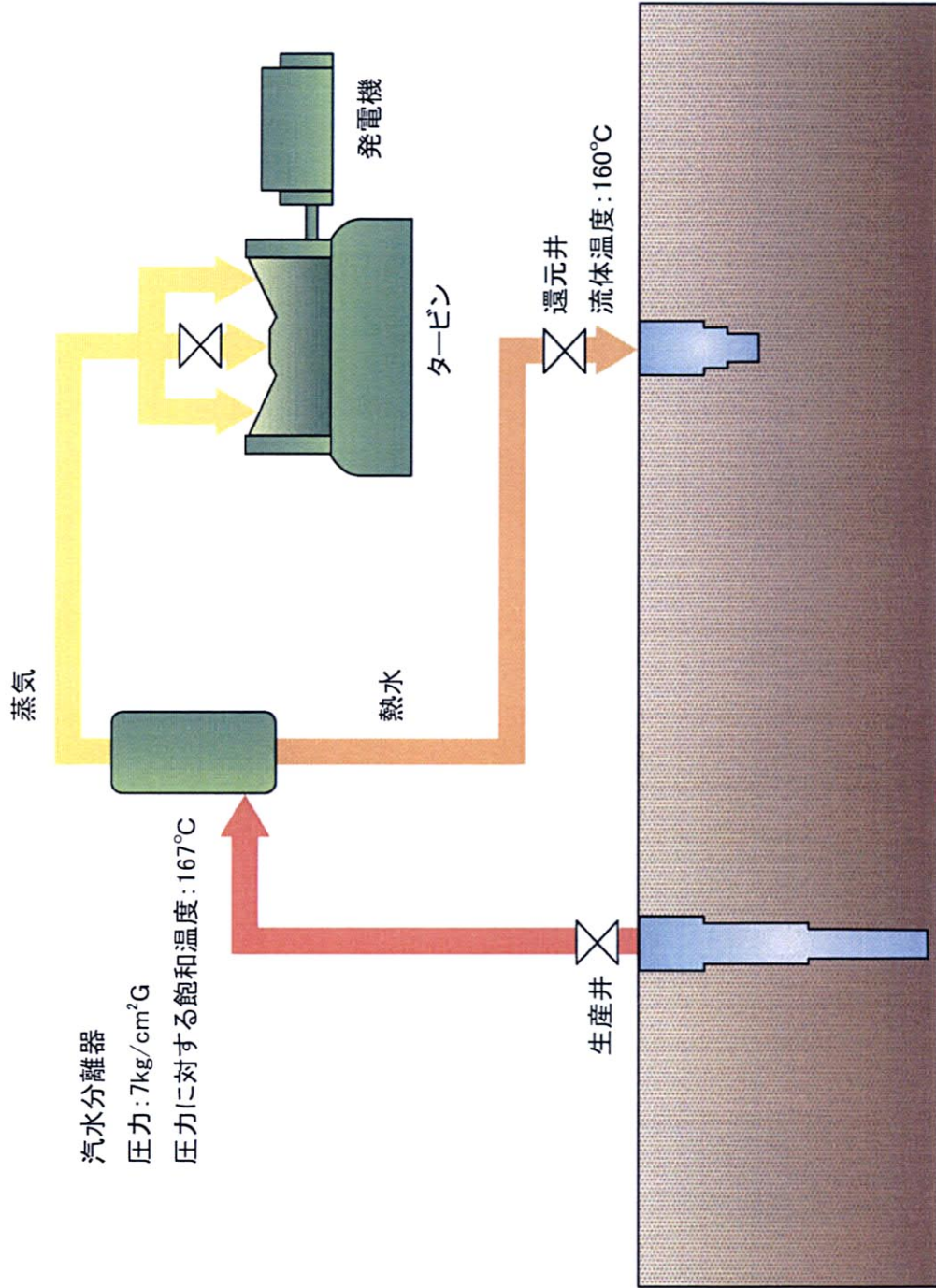


図 2-8-44 深部生産井の熱水の還元模式

浅部井で生産された熱水流量は後述するように 1,181t/h から 1,217t/h に微増している。ここでは熱水流量を 1,200t/h で一定、セパレータからフラッシュまでの流体の総エンタルピーを一定と仮定して、フラッシュ後の総熱水流量を 1,130t/h とした。この総熱水流量を表 2-8-4 に示すように各還元井に配分した。

一方、深部井で生産された熱水流量は 1 本あたり 200~230t/h である。そこで、深部井の熱水の還元流量を平均の 215t/h とし、深部補充井 1 本につき還元井 1 本を追加するように設定した。

(ii) 計算結果

(1) 還元なしの生産予測シミュレーション(段階 I)の計算結果

① 深部補充井を追加しないケース(ケース I-1, 図 2-8-45~48)

深部補充井を追加しない場合(ケース I-1)では、2006 年から 2036 年の 30 年間で総蒸気流量は 167t/h から 146t/h に低下すると計算された(図 2-8-45)。流入点ブロックの温度・圧力は予測期間中ほぼ安定している(図 2-8-46, 47)。上記の結果を考慮すると、本ケースで計算した深部補充井を追加せず、現状の浅部生産井のみで 30 年間生産を実現できる能力が、本貯留層には十分あると考える。これは最近の発電出力がほぼ安定していることから支持される。

② 現状に ZK4001 のみ追加するケース(ケース I-2, 図 2-8-49~54)

現状の生産井に ZK4001 のみ追加した場合(ケース I-2)では、2006 年から 2036 年の 30 年間で総蒸気流量は 220t/h から 187t/h に低下すると計算された(図 2-8-49)。流入点ブロックの温度・圧力は予測期間中ほぼ安定している(図 2-8-50~53)。上記の結果を考慮すると、本ケースで計算した現状の生産井に ZK4001 のみ追加した生産を実現できる能力が、本貯留層には十分あると考える。

③ 総蒸気流量 200t/h 維持のケース(ケース I-3, 図 2-8-55~60)

総蒸気流量が 200t/h を下回らないようにするケース(ケース I-3)では、深部の補充井を 2 本追加する必要があると計算された。浅部の流入点のブロックの圧力は、2025 年に深部の補充井 ZK4003 が追加されると、低下量が大きくなるが、概ね安定した経時変化を示す(図 2-8-56)。浅部井・深部井の温度には著しい温度低下は見られない(図 2-8-58, 59)。従って、本ケースで計算した蒸気流量 200t/h を下回らない生産を実現できる能力が本貯留層にはあると考える。

④ 総蒸気流量 240t/h 維持のケース(ケース I-4, 図 2-8-61~66)

総蒸気流量が 240t/h を下回らないようにするケース(ケース I-4)では、深部の補充井を 7 本追加する必要があると計算された。浅部の流入点のブロックの圧力は、2006 年から 2023 年にかけて低下した後、2023 年以降は安定している(図 2-8-62)。深部の流入点のブロックでは、一部の坑井で圧力低下量が 30 年間で 3.0MPa とやや大きい(図 2-8-63)。浅部井・深部井の流入点ブロックの温度は緩やかに低下しているものの、著しい温度低下ではない(図 2-8-64, 65)。上記の結果を考慮すると、本ケースで計算した蒸気流量 240t/h

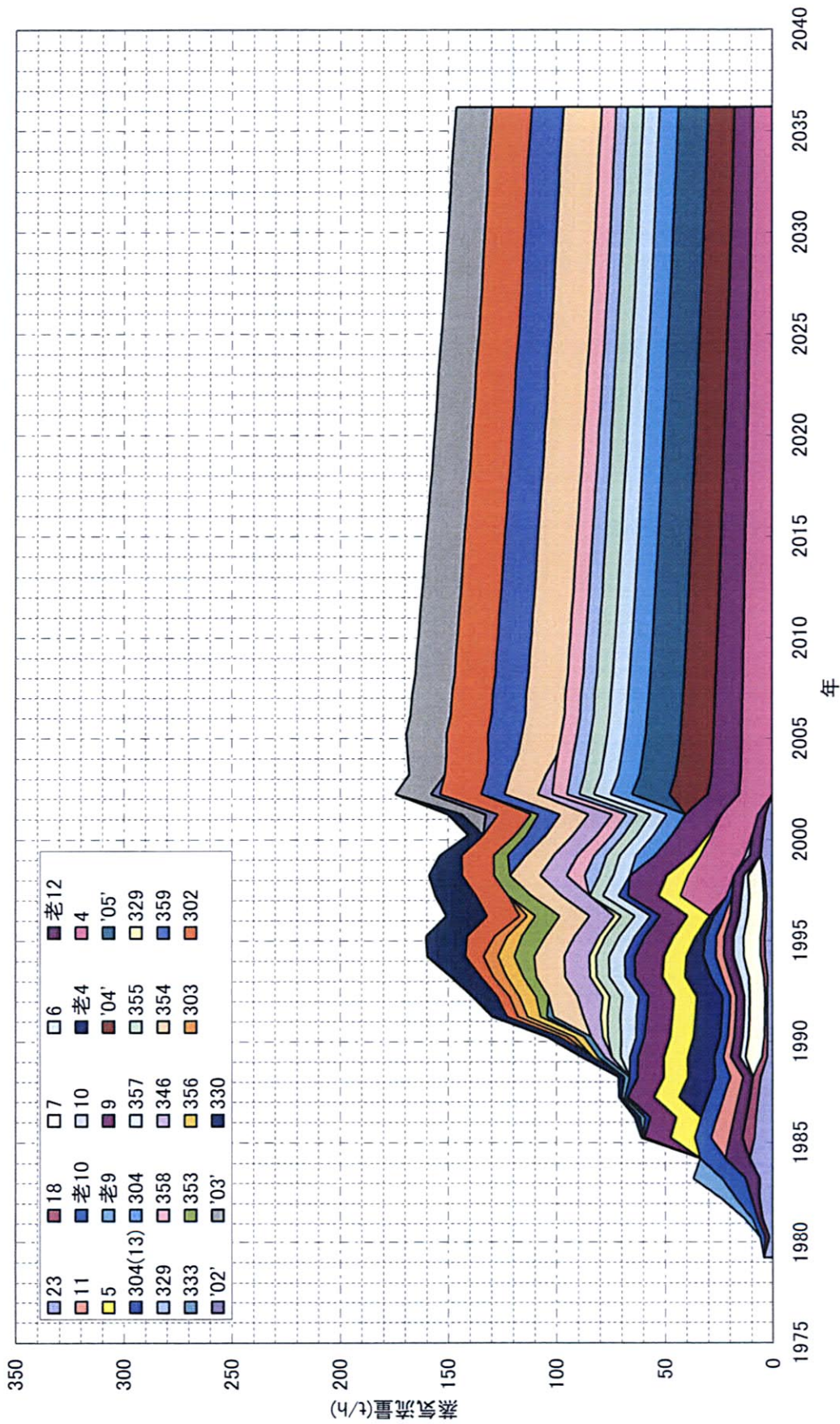


図2-8-45 蒸気流量の挙動予測結果(ケース I -1: 生産井現状維持の設定)

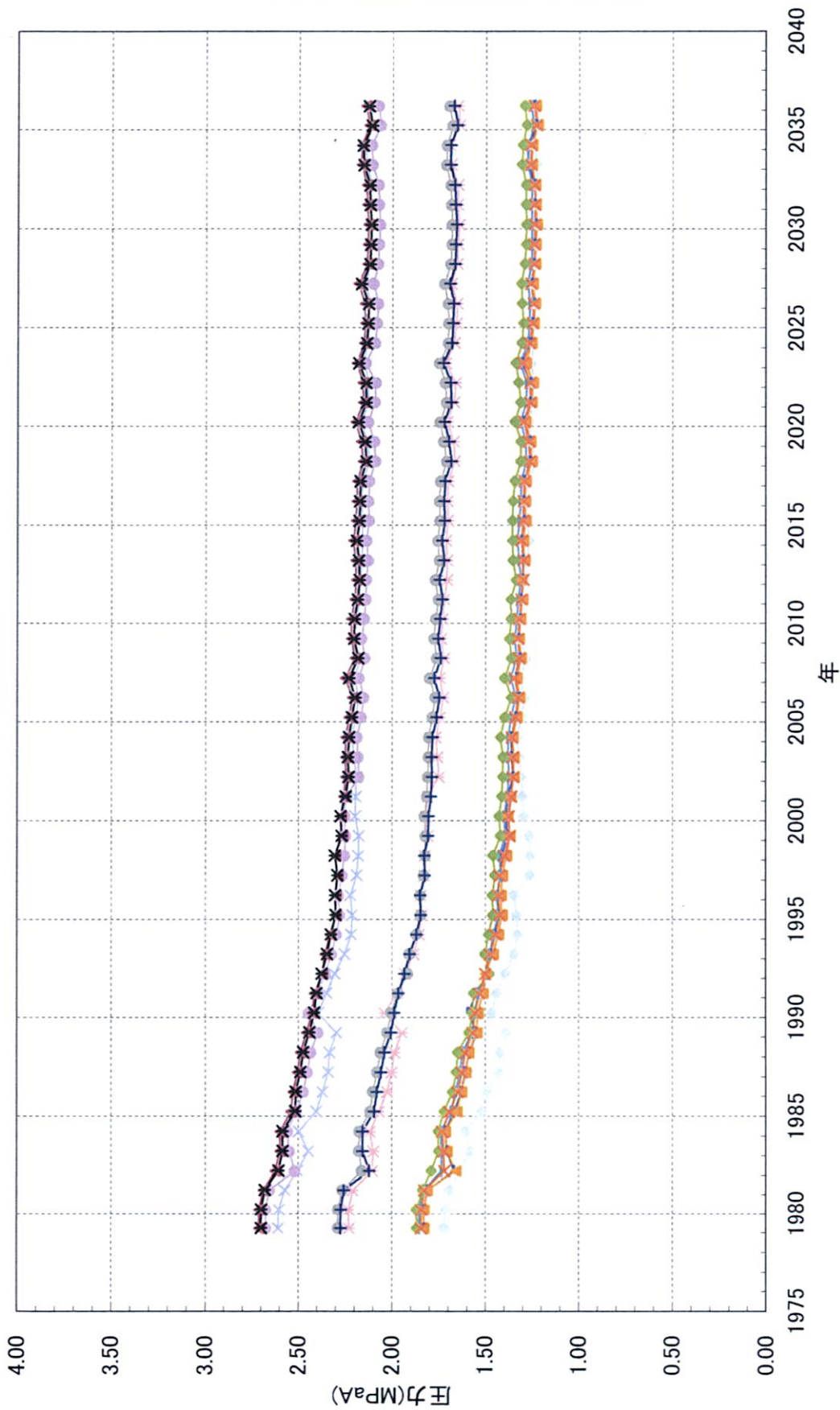


図2-8-46 流入点ブロック圧力の挙動予測結果(ケース I-1: 生産井現状維持の設定)

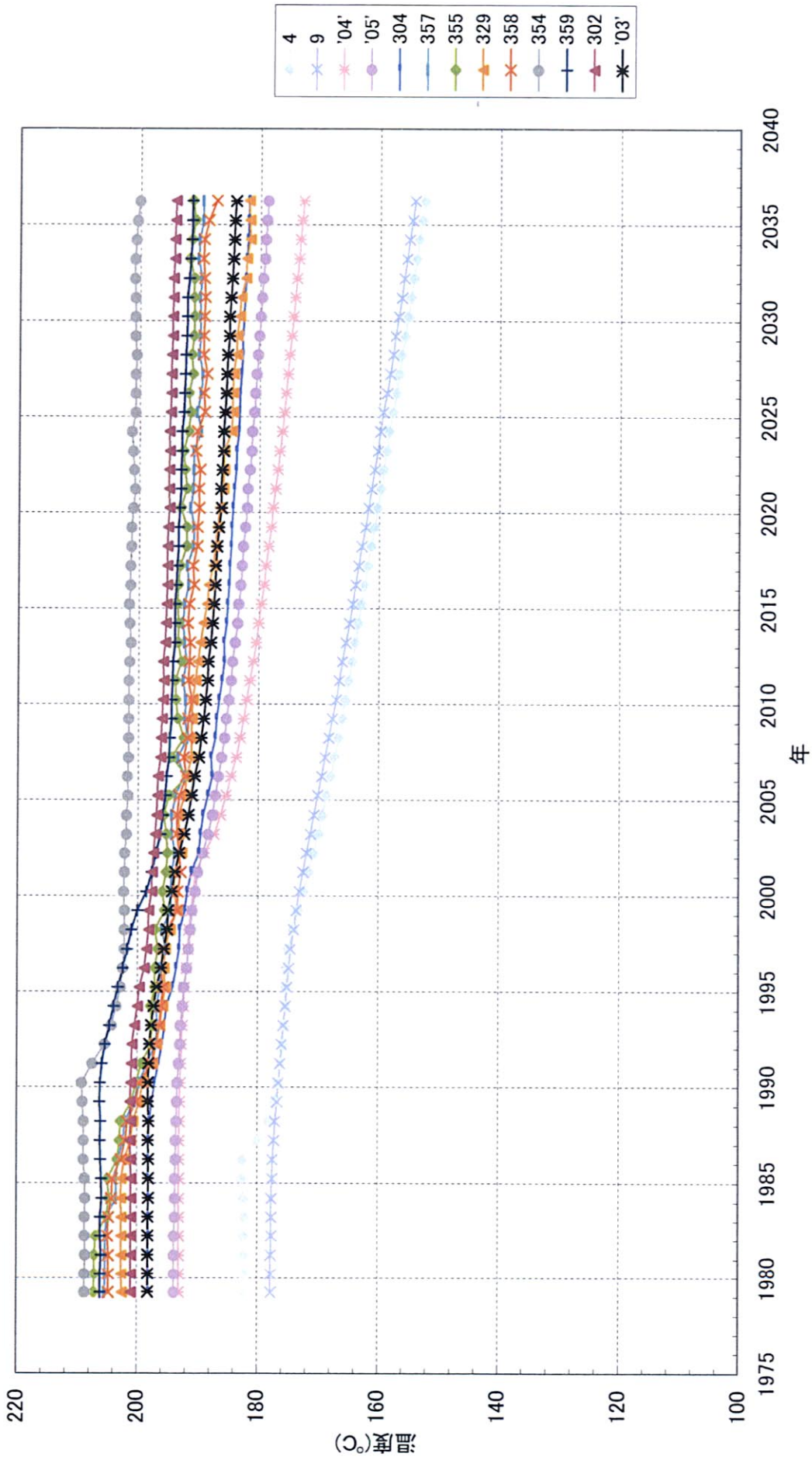


図2-8-47 流入点ブロック温度の挙動予測結果(ケースI-1:生産井現状維持の設定)

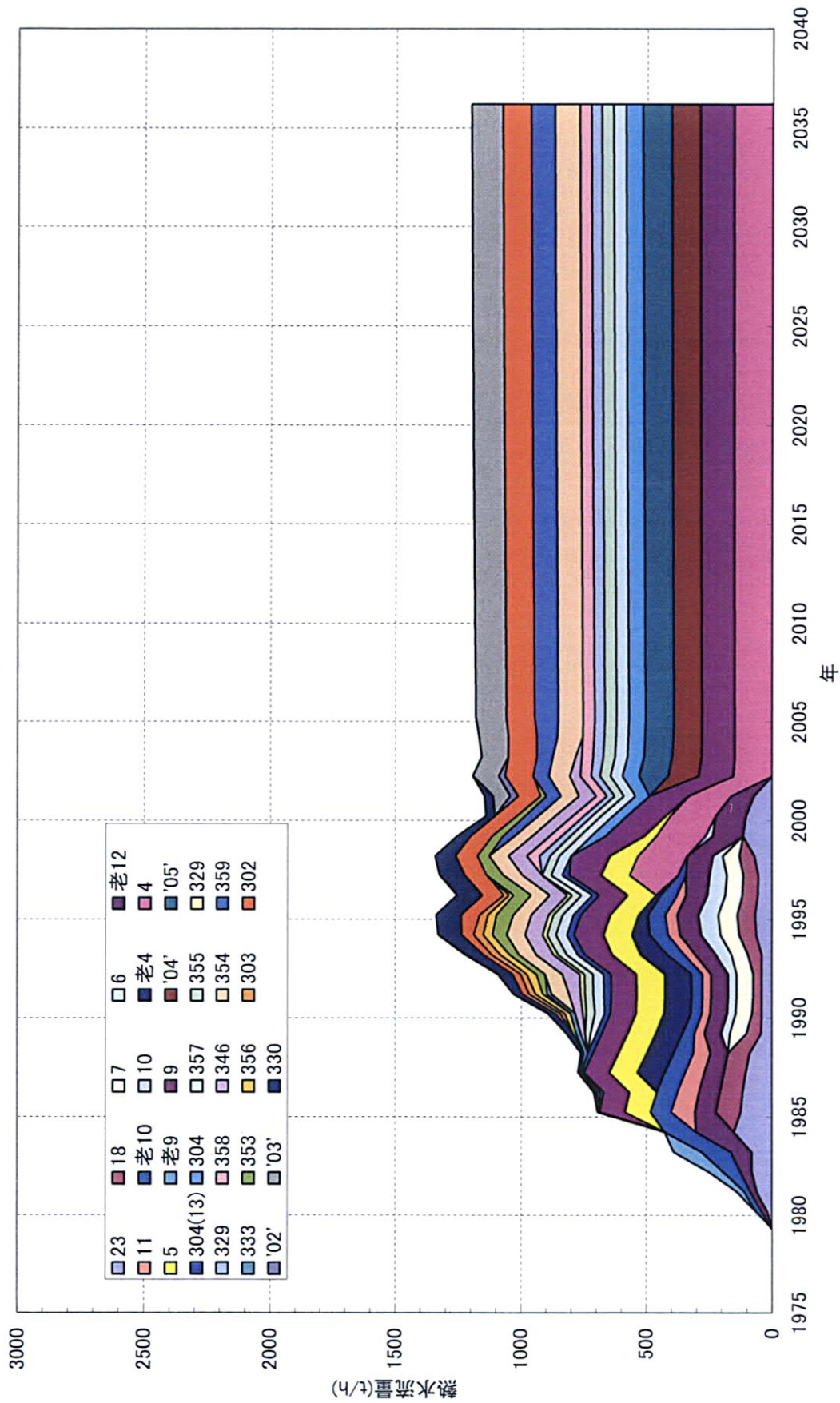


図2-8-48 熱水流量の挙動予測結果(ケース I-1: 生産井現状維持の設定)

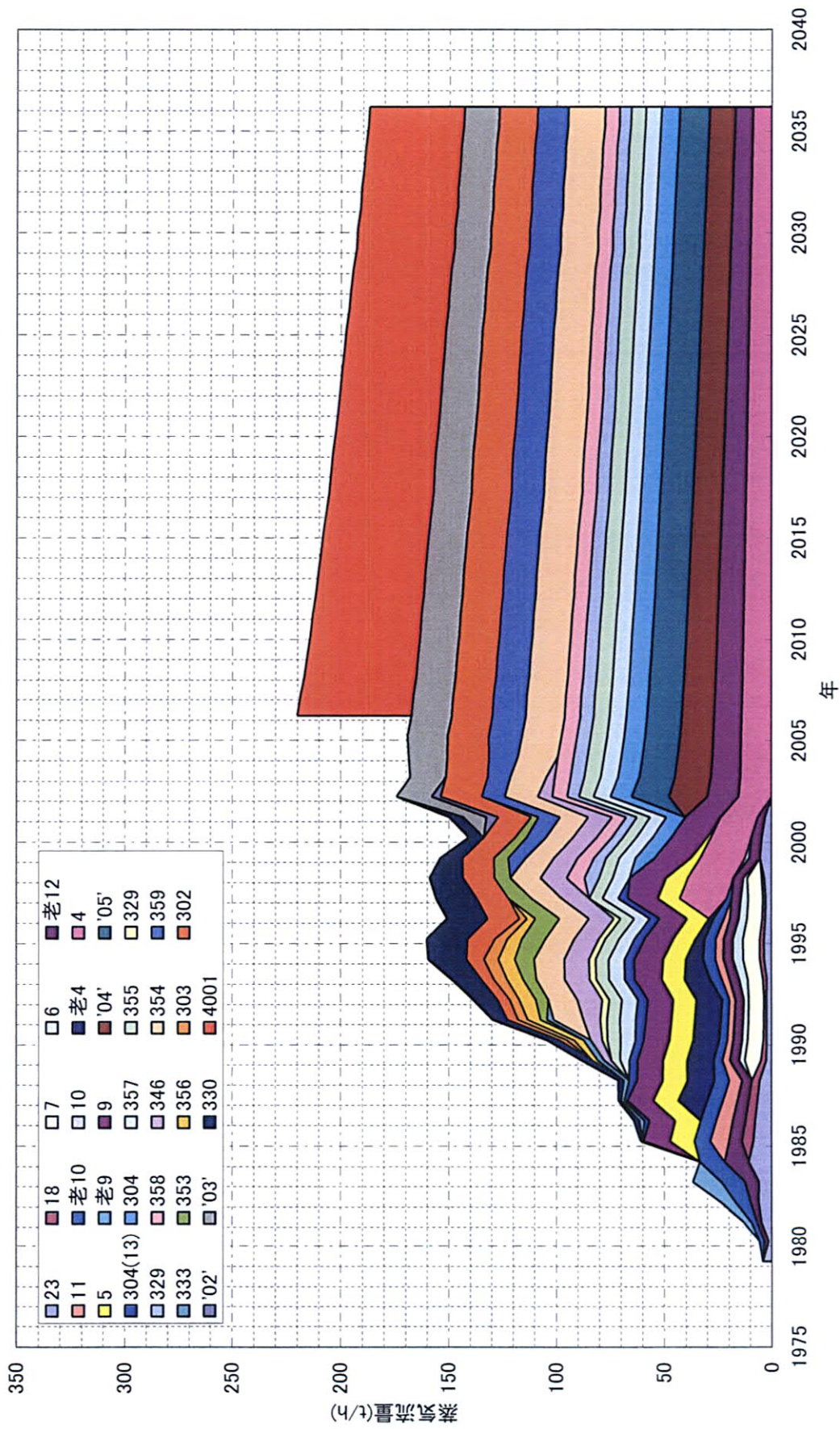


図2-8-49 蒸気流量の挙動予測結果(ケースI-2:生産井現状維持+ZK4001の設定)