

第6章 貯留層になりうる範囲の設定と USGS 容積法に基づく資源密度分布図の作成

本章では、地熱貯留層となりうる範囲を設定し、USGS 容積法を用いて地熱資源量を推計し、資源密度分布図を作成した結果を記述する。

6.1 貯留層になりうる範囲の設定

(1) 範囲の設定方法の検討

容積法において地熱貯留層となりうる範囲の設定は、地熱資源量の算定結果を大きく左右するファクターとなる。平成 24 年度の検討結果でも、NEDO 詳細容積法との乖離の原因の一つとして指摘されている。したがって、地熱貯留層の適切な範囲設定は地熱資源量算定の精度向上にあたって重要な課題である。

地熱貯留層となりうる範囲を、地下温度構造データにおいて熱量を積算する上面標高と下面標高の範囲とする。

地熱貯留層となりうる範囲の設定方法として以下の 2 案を検討した。

案 1：地下温度構造を基に設定する方法

案 2：既存資料から平均的な貯留層厚さを設定する方法

案 2 は、NEDO 調査や既設発電所における坑井データ等を用いて、平均的な貯留層厚さを設定し、全国的にその値を適用する方法である。しかし、NEDO 調査や既設発電所のモデルは蒸気フラッシュ発電を想定した貯留層のモデルであり、火山周辺や高温熱源岩体等が存在する地域には適用できる可能性があるが、全国的な貯留層モデルとして一律に適用するには疑問が残る。また、熱水資源開発では、「地下が高温である」以外に、「キャップロックが存在していること」が地熱貯留層の前提条件となるが、キャップロックが存在しているかどうかを全国的に判断することは実質的に不可能と考えられる。

したがって、本検討における地熱貯留層となりうる範囲の設定は案 1 により実施することとした。

(2) 具体的な範囲の設定方法

範囲の設定にあたっては「戦略的調査における容積法算出指針」を参考にした。

貯留層となりうる範囲の下面標高は、貯留層基盤標高を基本とした。ただし、H24 年度に実施したヒアリングにおいて、NEDO 詳細容積法の計算においては、地下温度が 350℃以上となった場合、脆性-延性境界を越えてしまい発電には不向きとなってしまうため、貯留層基盤標高よりも高い位置で地下温度が 350℃以上となった場合には、その標高をもって下面標高を設定する。

地熱貯留層となりうる範囲の上面標高は、開発対象とする発電方式によって異なってくる

る。これは、作成する資源密度分布図の対象温度区分の下限温度で設定する必要があり、例えば、「蒸気フラッシュ発電で世界的な実績に基づく場合」には地下温度構造データが180℃以上になる深度と考えられる。なお、低温バイナリーの想定下限温度は現在の一般的な技術レベルを鑑みて、80℃を新たに想定したが、これは、将来の技術開発で低温側に範囲が拡大する可能性がある。

この手法では地下温度構造が全国的にモデル化されていることが大前提であるが、地下温度構造データベースを用いることによって全国的な設定が可能である。ただし、対象とする発電形式を多数想定する場合には、複数の上面標高を設定する必要があり、アルゴリズムが複雑になる。

表 6.1-1 発電形式を想定した対象温度区分

発電方式	対象温度区分	備考	記号
蒸気フラッシュ	150℃以上	既存調査のものと同様	F①
	180℃以上	世界的な実績に基づく	F②
	200℃以上		F③
バイナリー（ランキンサイクル想定）	120～150℃	既存調査のものと同様	B①
	120～180℃		
低温バイナリー（カーナサイクル想定）	53～120℃	既存調査のものと同様	LB①
	80～120℃	現在の一般的な技術レベル相当	LB②

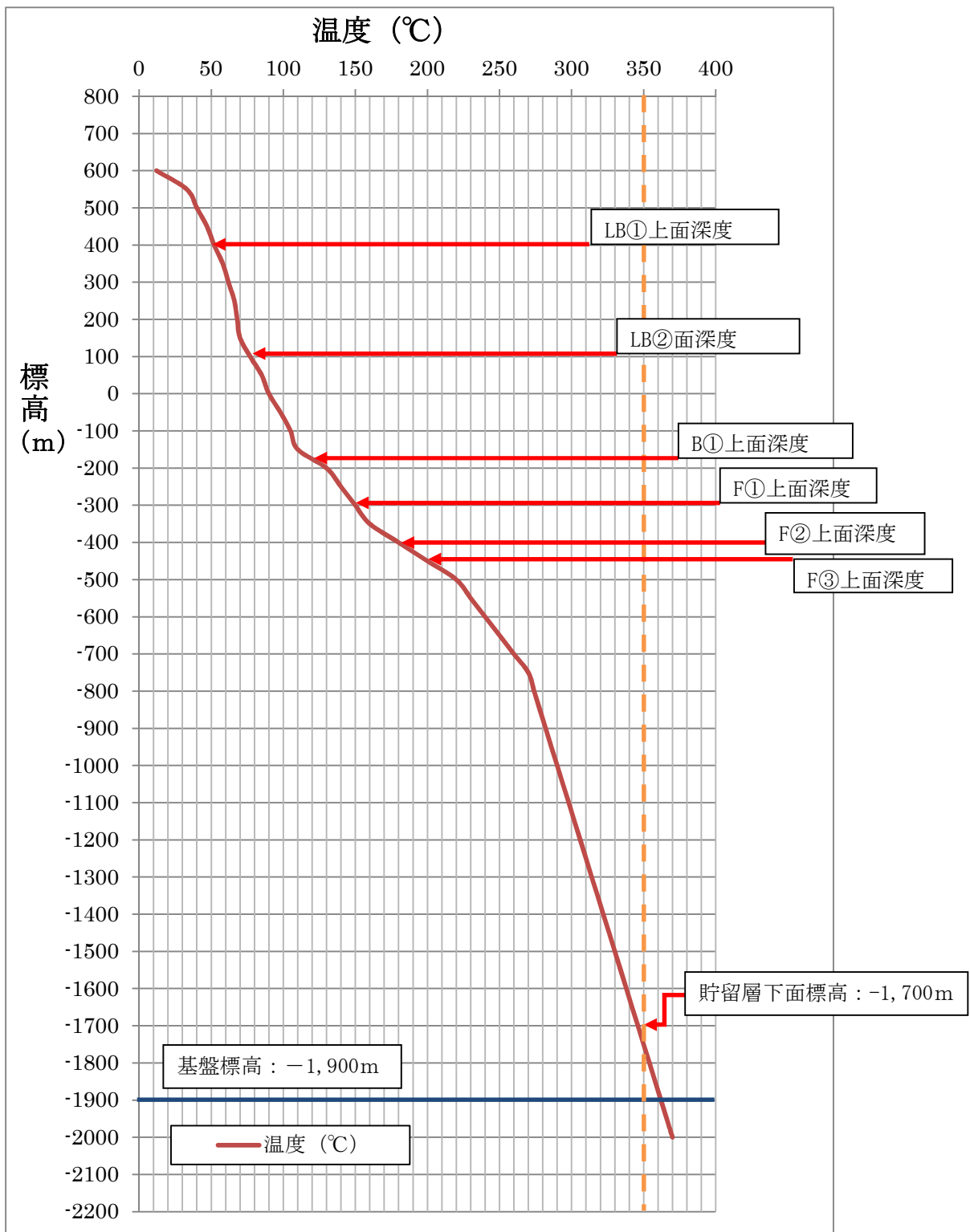


図 6.1-1 発電形式を想定した対象温度区分

6.2 USGS 容積法に関する詳細前提条件と推計アルゴリズムの設定

(1) USGS 容積法に関する詳細前提条件

推計のための前提条件（発電方式、下限温度等）を整理する。主な前提条件案を以下に示す。

- 1) 発電方式別（蒸気フラッシュ、バイナリー）に基準温度及び発電効率を設定する。
- 2) 適用可能な下限温度については複数設定する（蒸気フラッシュ：150℃、180℃など）
- 3) 過年度調査では、低温バイナリー（温泉発電）の下限温度を 53℃と設定していたが、昨年度調査でのヒアリング結果を踏まえ、低温バイナリー（温泉発電）の下限温度を、現在の実用的下限温度である 80℃についても設定する。
- 4) 資源密度（kW/km²）は、USGS 容積法により評価した資源量を、30 年間で使用することを前提として 30 年で除算することで算出し推計した。
- 5) 本アルゴリズムでは、ほぼ一定の地温勾配を仮定している。作成された温度プロファイルには、地温勾配が急激に変化する結果が含まれている。このような温度プロファイルでは、貯留層の下限温度と最高温度から求めた貯留層の平均温度が低く評価されるため、対象温度区分間で地熱資源量の逆転現象が発生する。ここでは貯留層（レザバー）の平均温度は、レザバー内の全地温の平均とした。

(2) USGS 容積法に基づく推計アルゴリズムの検討

これまでの資源密度図の作成には USGS 容積法を用いられてきた。本年度調査でも USGS 容積法を用いることとしつつも、アルゴリズムに以下の変更を行う。

- ・ 単位区画を 500m×500m に変更する。
- ・ 各単位区画の温度プロファイル（深度 50m 間隔）と貯留層底面深度から資源密度を計算する。
- ・ メインプログラムの冗長性を解消する。
- ・ 対話形式でパラメータを入力・設定するように変更する。
- ・ 四分割した入力データファイルで計算できるように変更する。
- ・ 上限温度を 350℃に設定・変更する。
- ・ 貯留層（レザバー）の平均温度は、レザバー内の全地温の平均「 Σ （地温）/地温点数」
として計算する。

(3) 推計プログラムの改良

上述(2)に基づき、推計プログラムに関して表 6.2-1 に示す改良を行った。

表 6.2-1 推計プログラムの改良点

課題	改良点	備考
単位区画が粗い(大きい)	プログラムの単位区画面積を 500m×500m にする	
重力基盤深度から設定した貯留層底面深度は、特に優勢な地熱地域で実態に即していない場合が多い	資源密度計算アルゴリズムで貯留層底面深度を、重力基盤上面深度から別途与えられる貯留層底面深度に変更する	平成 24 年度の検討結果で指摘された事項
メインプログラムが冗長である	メインプログラムの計算ブロックをサブルーチン及びファンクションとし、メインプログラムを簡素化する	
パラメータ設定に柔軟性がない	プログラムを対話形式に変更し、計算の都度、パラメータを入力・設定するように変更する。また、パラメータ・ファイルを別途作成し、数ケースを一括計算する方式も採用するように変更する。	
単位区画を細かくすると入力データのファイルサイズが大きくなり、データファイルの維持・管理が難しい	日本全国を四分割した入力データファイルで地熱資源量を計算し、集計するように変更する。	
地下温度が 350℃以上となった場合、脆性-延性境界を越えてしまい発電には不向きになってしまうため	350℃以上の場合は計算を行わないように変更する。	
想定外の温度プロファイルによる対象温度区分間での地熱資源量の逆転	貯留層(レザバー)の平均温度は下限温度と最高温度の平均でなく、レザバー内の全地温の平均「 Σ (地温)/地温点数」とする。	

USGS 容積法による地熱資源量評価（参考）

容積法は、米国地質調査所 (Brook *et al.*, 1979¹) により確立された一つの標準的な地熱資源評価法であり (以下 USGS 容積法と呼ぶ)、その概念が比較的単純で、さまざまな地質学的条件の地熱地域に適用できるという利点があり、地熱貯留層の容積と温度を与えることにより、地熱資源量を計算することができる。

USGS 容積法の評価手順は以下の通りである (Brook *et al.*, 1979、村岡, 1991²)。

$$q_R = \rho_c \cdot a \cdot d \cdot (t - t_{ref})$$

ここで、

q_R : 地熱貯留層熱エネルギー (J)

ρ_c : 含水岩石の容積比熱 (岩石容積比熱 $2.5 \times 10^{-6} \text{J/m}^3/\text{°C}$, 孔隙率 15% を仮定して, $2.7 \times 10^{-6} \text{J/m}^3/\text{°C}$)

a : 貯留層面積 (m^2)

d : 貯留層厚さ (m)

t : 貯留層温度 ($^{\circ}\text{C}$)

t_{ref} : 基準温度 ($^{\circ}\text{C}$)

上式のカラム熱量を基にする方法では、単位区画 ($1\text{km} \times 1\text{km}$) の熱エネルギーは

$$q_R = \rho_c \cdot a \int_{LD}^{UD} (t(z) - t_{ref}) dz$$

LD : 貯留層底部の深度 (m)

UD : 貯留層下限温度の深度 (m)

$t(z)$: 深度の関数としての貯留層温度 ($^{\circ}\text{C}$)

で与えられる。

この岩石や孔隙流体に蓄えられた熱エネルギー q_R は、浸透率などの制約、低エンタルピー流体や岩石からのエネルギー抽出の制約などのため、坑口で全て回収することはできない。回収率を R_g とすると、坑口回収エネルギー q_{wh} (J) は

$$q_{wh} = R_g \cdot q_R$$

単位質量の地熱流体が地熱貯留層から坑口まで上昇するのに要するエネルギー損失は次式で与えられる。

$$h_{WH} = h_R - (Z_R \cdot g)$$

ここで、

h_{WH} : 坑口での地熱流体の単位質量あたりのエンタルピー (kJ/kg)

h_R : 地熱貯留層での地熱流体の単位質量あたりのエンタルピー (kJ/kg)。貯留層温度を可変とする計算では、レザバー内の全地温の平均温度を計算し、平均温度に対応するエンタルピーを蒸気表³から求める。

Z_R : 貯留層下限温度の深度と貯留層底部深度の平均 (m)

g : 重力加速度 (m/s^2)

¹ Brook, C. A., Mariner, R. H., Mabey, D. R., Swanson, J. R., Guffaniti, M. and Muffler, L. J. P. (1979) Hydrothermal convection systems with reservoir temperatures $\geq 90^{\circ}\text{C}$. In: Muffler, L. J. P. ed., *Assessment of geothermal resources of the United States - 1978*, U. S. Geol. Surv. Circular, no. 790, p.18-85.

² 村岡 洋文 (1991) 八甲田地熱地域の地熱資源量評価. 地質調査所報告, 275, 153-164.

³ 日本機械学会 (1981) 蒸気表. 日本機械学会.

機械的仕事量 (W_A) は次式で表される。

$$W_A = \frac{q_{wh}}{h_{wh} - h_{ref}} [h_{wh} - h_o - t_o (s_{wh} - s_o)]$$

ここで、

h_{ref} : 基準温度での地熱流体の単位質量あたりのエンタルピー (kJ/kg)

h_o : 最終状態での地熱流体の単位質量あたりのエンタルピー (kJ/kg)

t_o : 地熱流体廃棄温度 (273.14+基準温度 K)

s_{wh} : 坑口での地熱流体の単位質量あたりのエントロピー (kJ/kg K)。 h_{wh} に相当するエントロピーを蒸気表から求める。

s_o : 最終状態での地熱流体の単位質量あたりのエントロピー (kJ/kg K)

電気エネルギー E は、機械的仕事量 W_A から発電効率 η_u を使って次式で求められる。

$$E = W_A \cdot \eta_u$$

この電気エネルギーを 30 年間にわたって、発電に使用すると、発電量は次のようになる。

$$E / 30 \text{ 年} = E / (30 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60) \quad (\text{J/s または W})$$

6.3 資源密度分布図の作成

(1) 資源密度分布図の作成

上記表 6.1-1 の対象温度区分を基に作成した資源密度分布図を図 6.3-1～7 に示す。

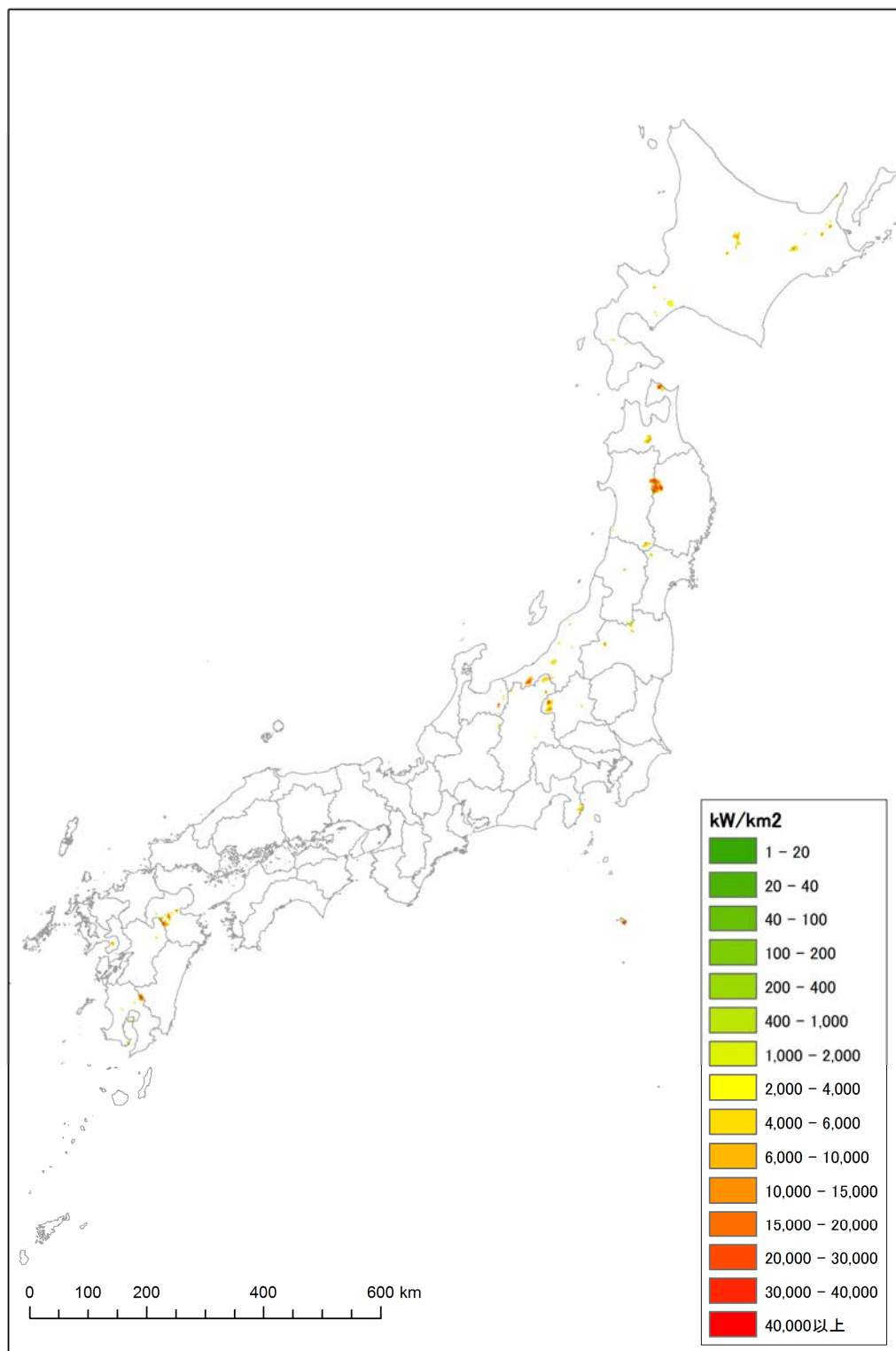


図 6.3-1 資源密度分布図（蒸気フラッシュ 150°C以上）

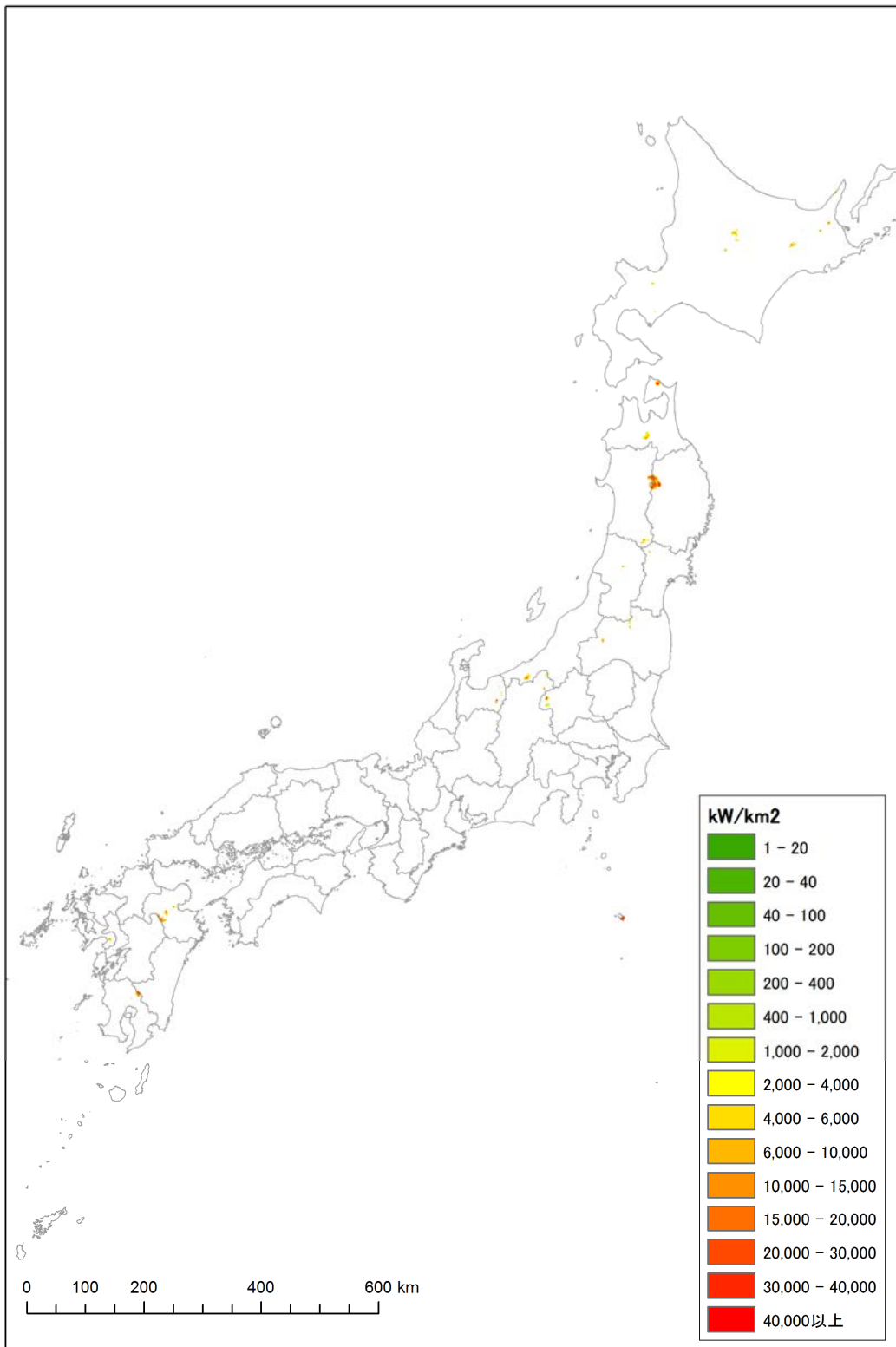


図 6.3-2 資源密度分布図（蒸気フラッシュ 180°C以上）

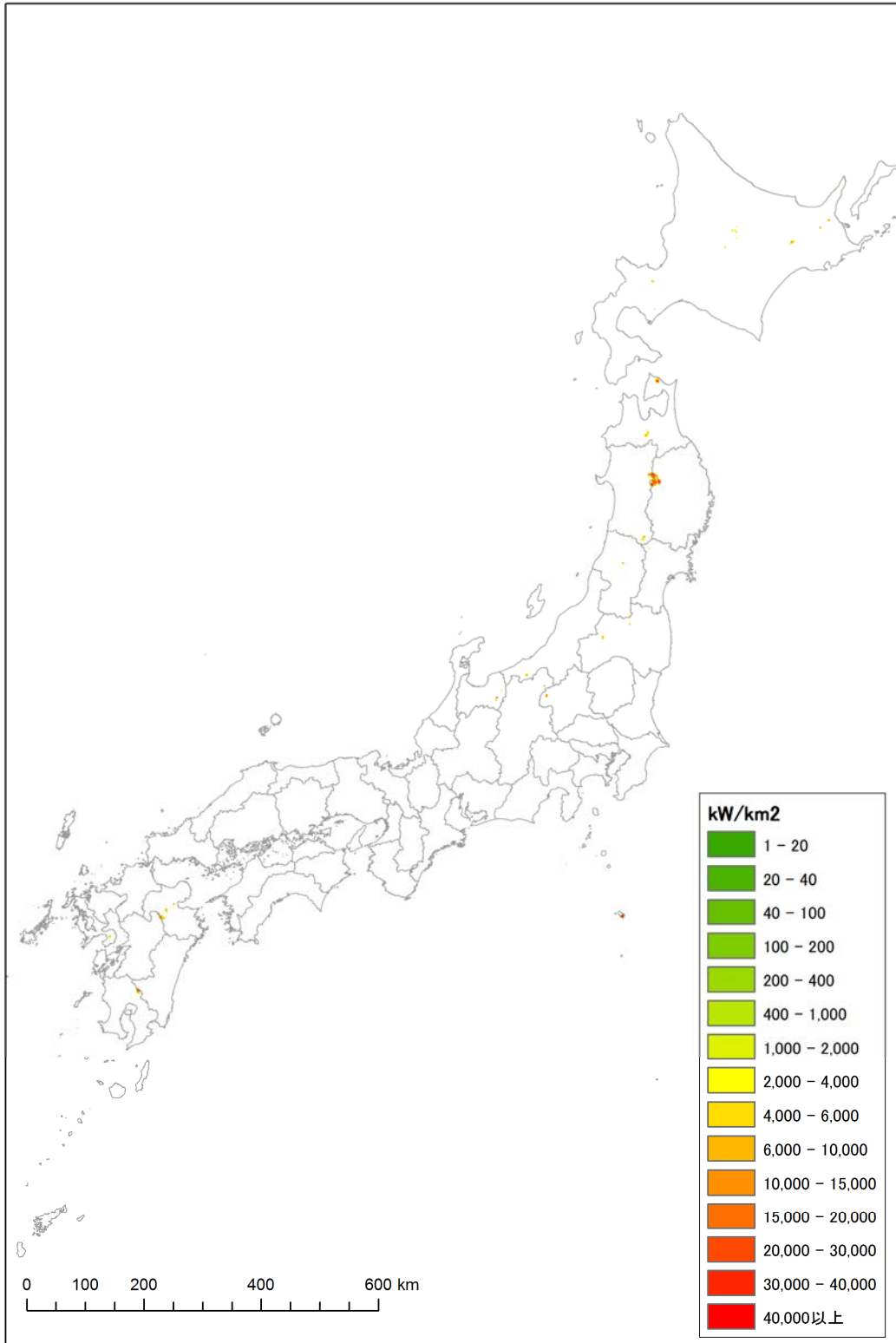


図 6.3-3 資源密度分布図（蒸気フラッシュ 200°C以上）

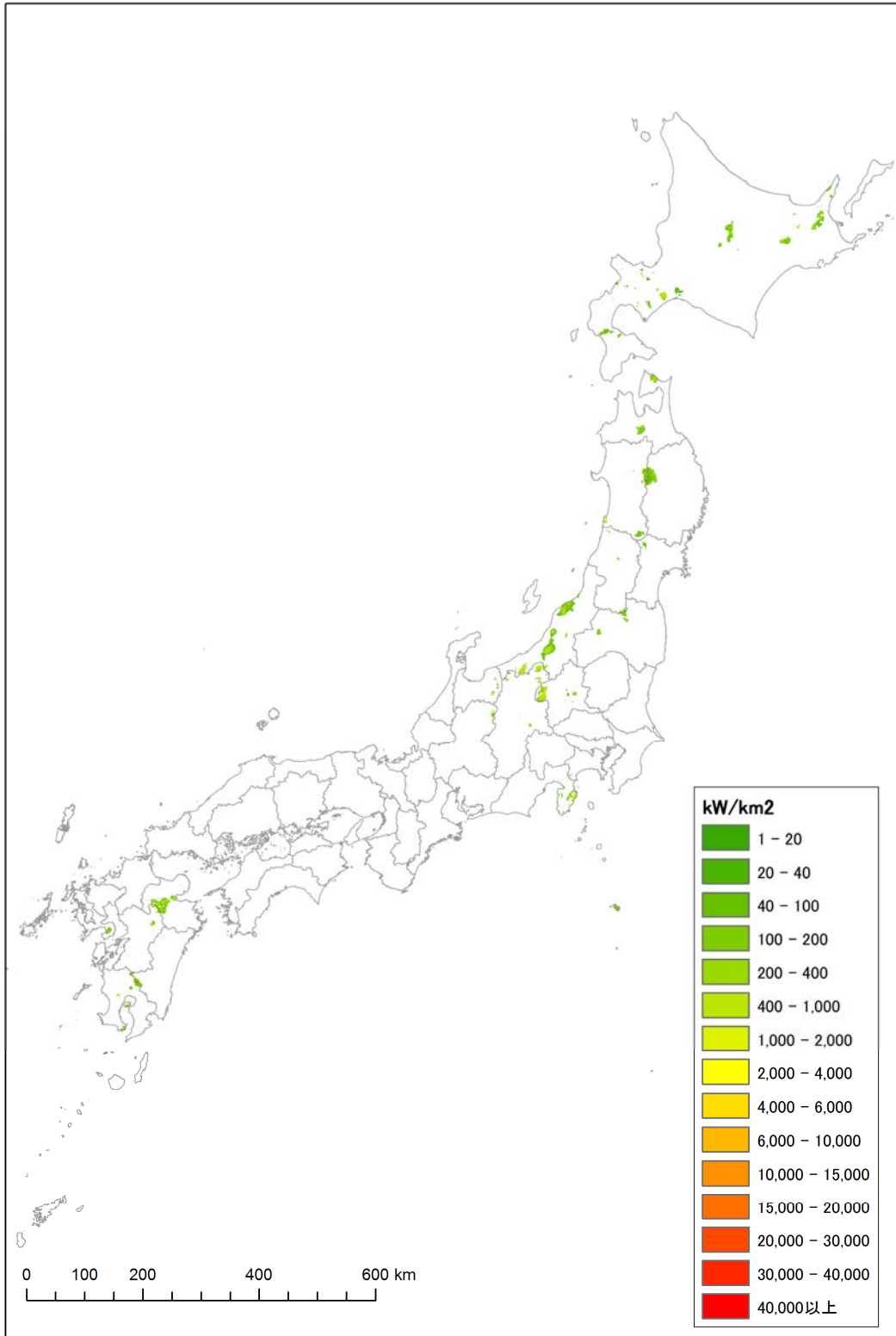


図 6.3-4 資源密度分布図（バイナリー（ランキンサイクル想定）120～150℃以上）

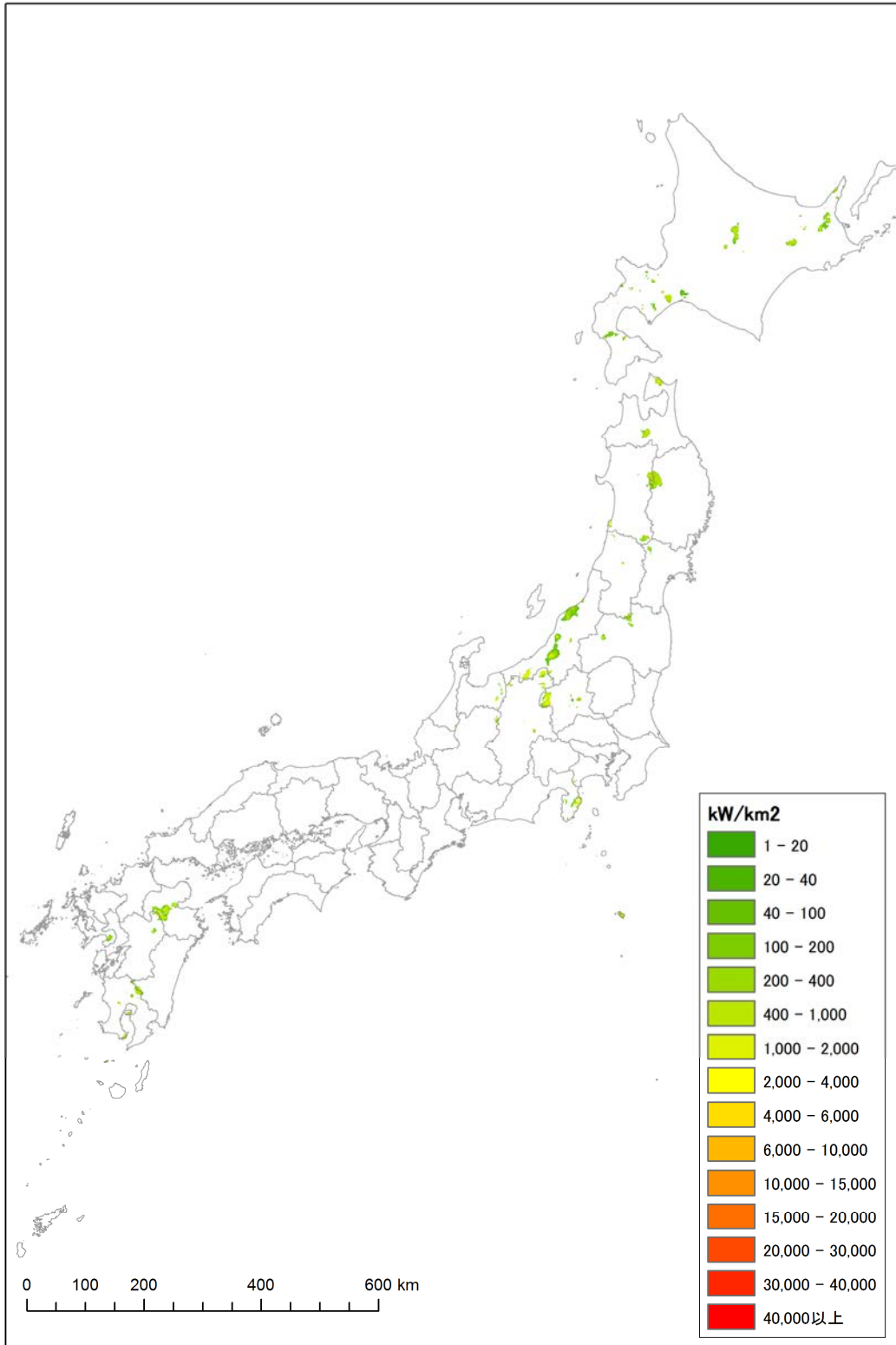


図 6.3-5 資源密度分布図 (バイナリー (ランキンサイクル想定) 120~180°C以上)

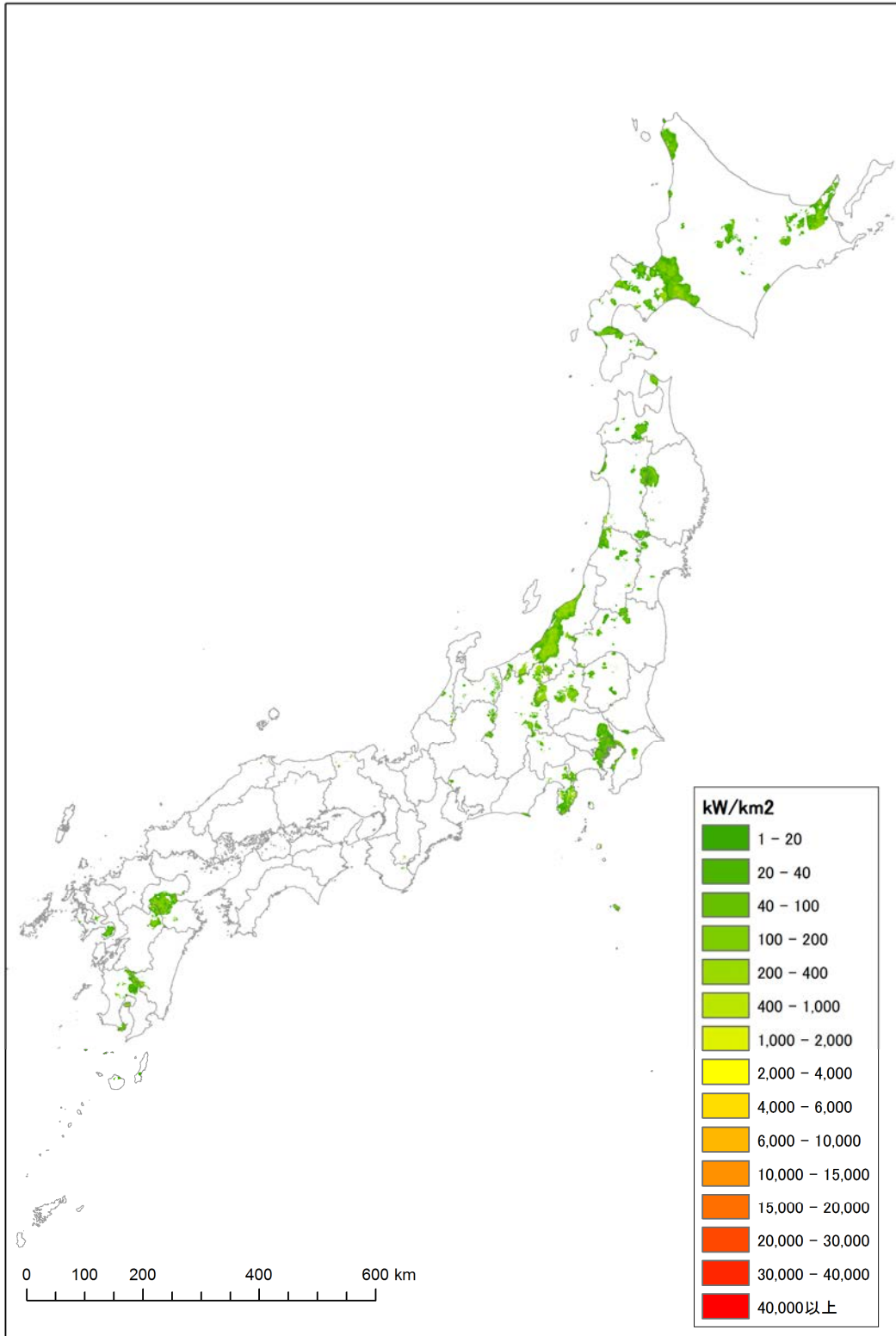


図 6.3-6 資源密度分布図（低温バイナリー（カーリーナサイクル想定）53～120°C以上）

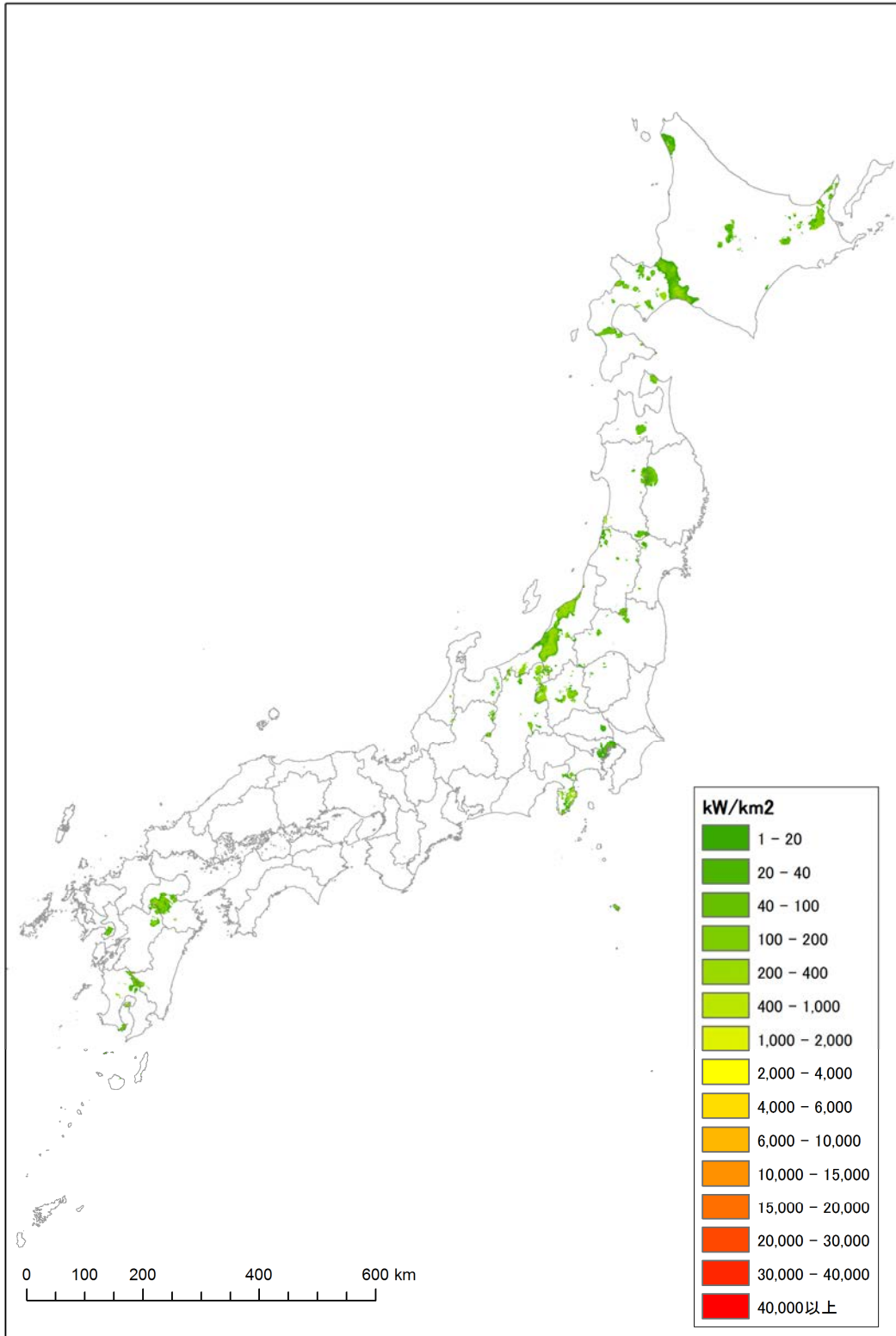


図 6.3-7 資源密度分布図（低温バイナリー（カーリーナサイクル想定）80~120°C以上）

ここで、H22 年度調査で作成した資源密度分布図と今回作成した資源密度分布図の比較図(150℃以上)を図 6.3-8~11 に示す。

比較の結果、以下の地域で精緻化が確認された。

① H22 年度で過大評価されていた地域

十勝岳地域 : 温度構造データを見直した結果、資源量が少なくなった。

知床半島 : 温度構造データの外挿補間の誤差を見直した結果、資源量が少なくなった。

富山長野県境 : 貯留層基盤標高を表層地質により見直した結果、資源量が少なくなった。

② H22 年度で過小評価されていた地域

東伊豆地域 : 貯留層基盤標高を既存地質データから見直した結果、資源量が表出した。

③ H25 年度に詳細調査結果のデータを追加したことにより資源量が表出した地域

主に以下の地域で NEDO の地熱開発促進調査データを追加した結果、資源量が表出または大きくなった。

- ・ 標津地域
- ・ 下北地域
- ・ 八甲田地域
- ・ 八幡平地域
- ・ 吾妻安達太良地域
- ・ 奥会津地域
- ・ 八丁原地域
- ・ 九重地域
- ・ 大岳地域
- ・ 霧島地域

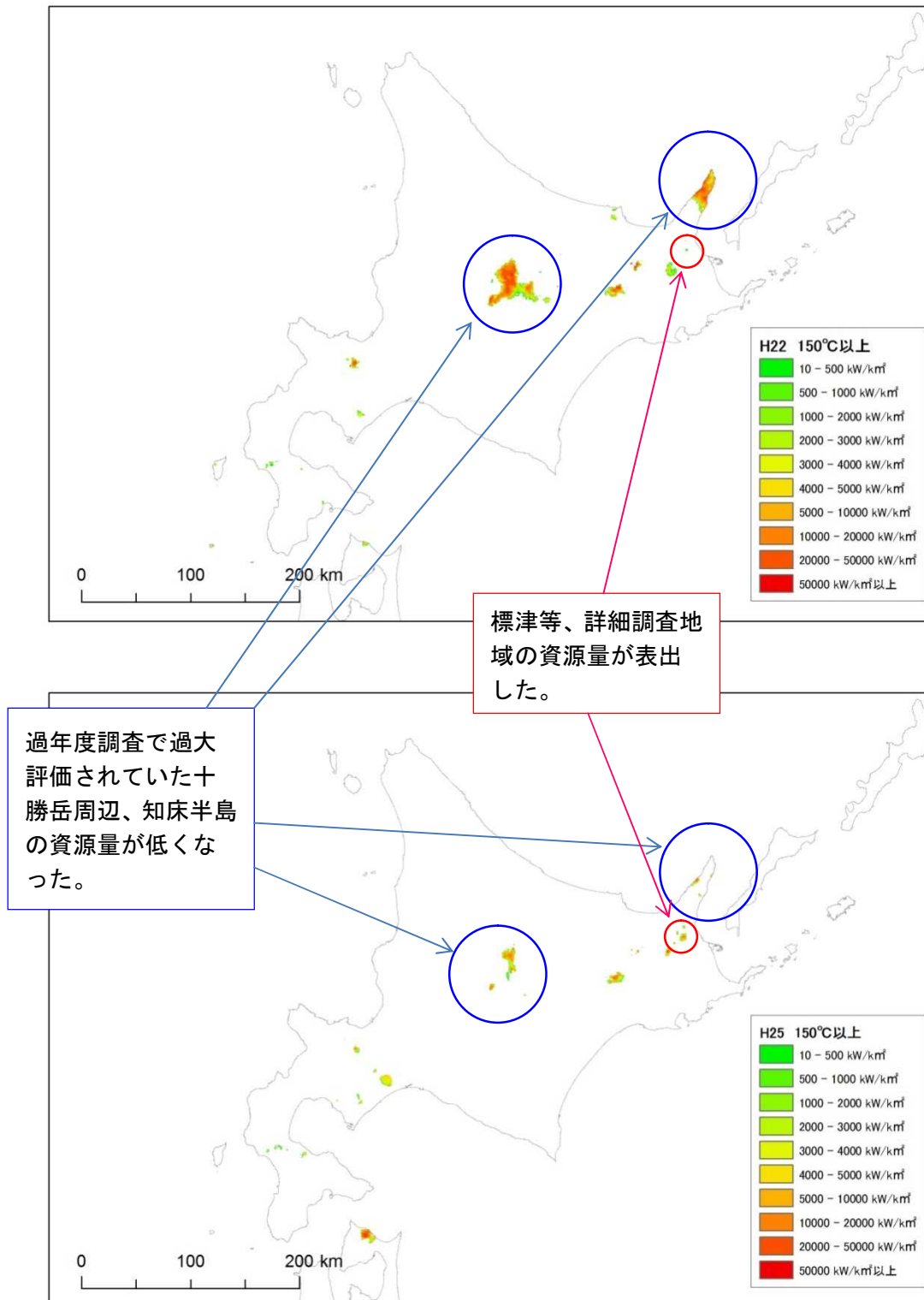


図 6.3-8 H22 年度及び H25 年度資源密度分布図の比較（北海道 150°C以上）

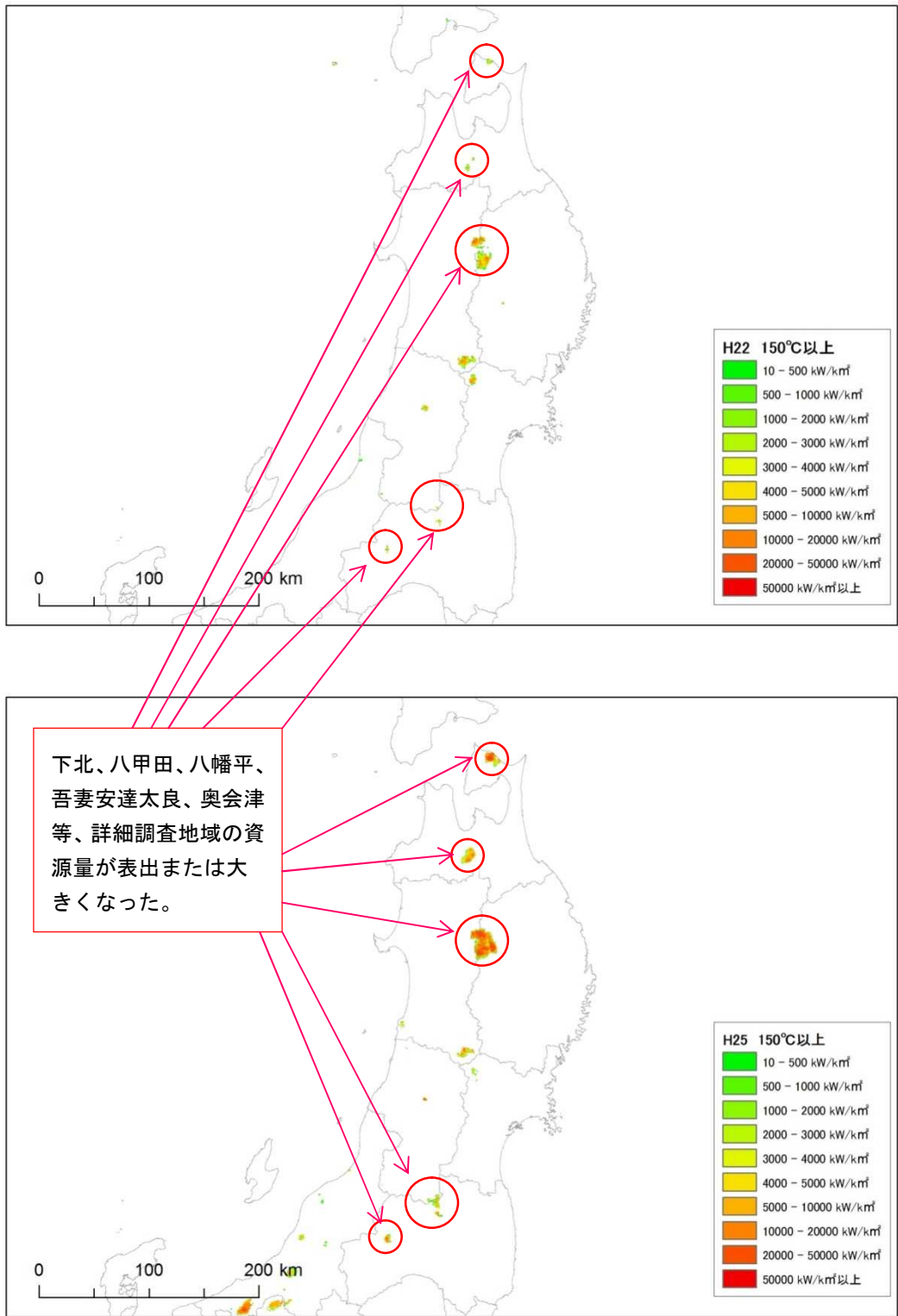


図 6.3-9 H22 年度及び H25 年度資源密度分布図の比較（東北 150°C以上）

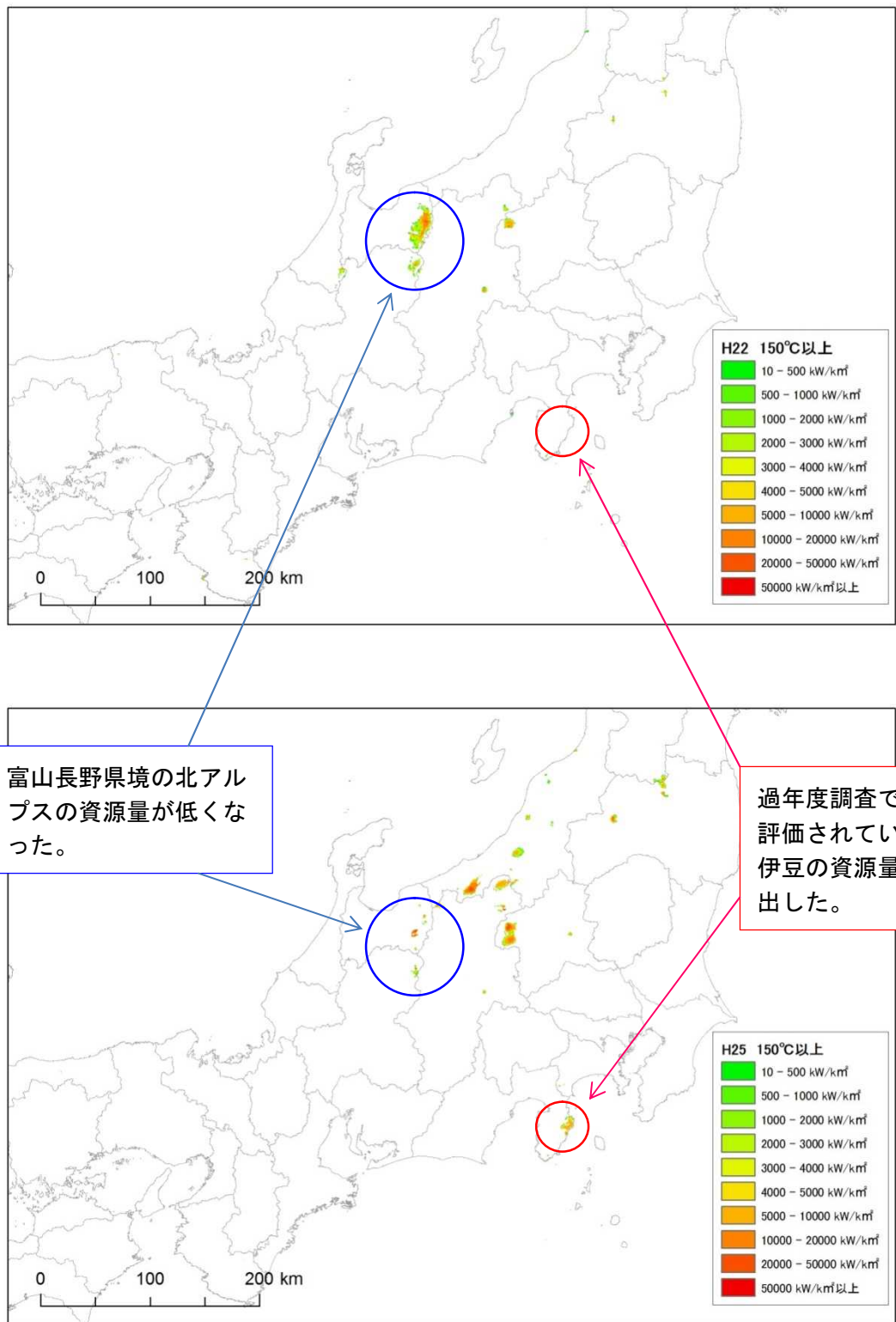


図 6.3-10 H22 年度及び H25 年度資源密度分布図の比較（関東中部 150°C以上）

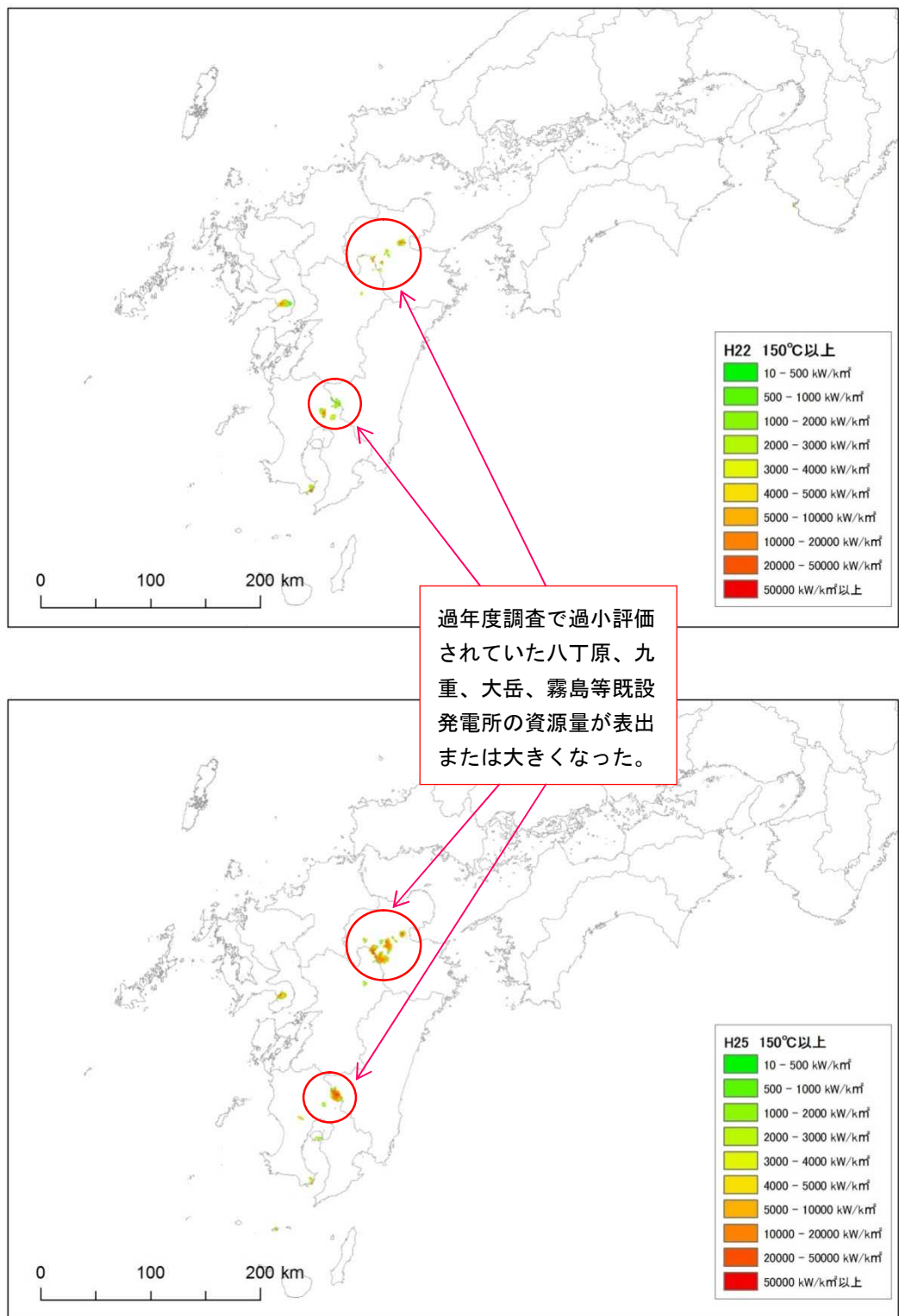


図 6.3-11 H22 年度及び H25 年度資源密度分布図の比較（九州 150°C以上）

(3) 地熱資源量集計結果

1) 地熱資源量（全国）集計結果

地熱資源量（全国）集計結果を表 6.3-1、図 6.3-12 に示す。平成 22 年度調査結果と比較すると、蒸気フラッシュ（150℃以上）とバイナリー（120～150℃）は、同程度の地熱資源量が表出したが、一方で低温バイナリー（53～120℃）は、約 5 分の 1 となった。これは周辺 5km 以内に温度データの存在しないエリアにダミーデータ（AI=0）を付したことにより、それらのエリアの地下温度が過年度調査よりも低くなったためと考えられる。

表 6.3-1 地熱資源量（全国）集計結果

発電方式	対象温度区分	地熱資源量 (万 kW)	参考：H22 調査結果 地熱資源量 (万 kW)
蒸気フラッシュ	150℃以上	2,219	2,357
	180℃以上	1,314	推計していない
	200℃以上	933	〃
バイナリー（ランキン サイクル想定）	120～150℃	120	108
	120～180℃	239	推計していない
低温バイナリー（カリ ーナサイクル想定）	53～120℃	199	849
	80～120℃	143	推計していない

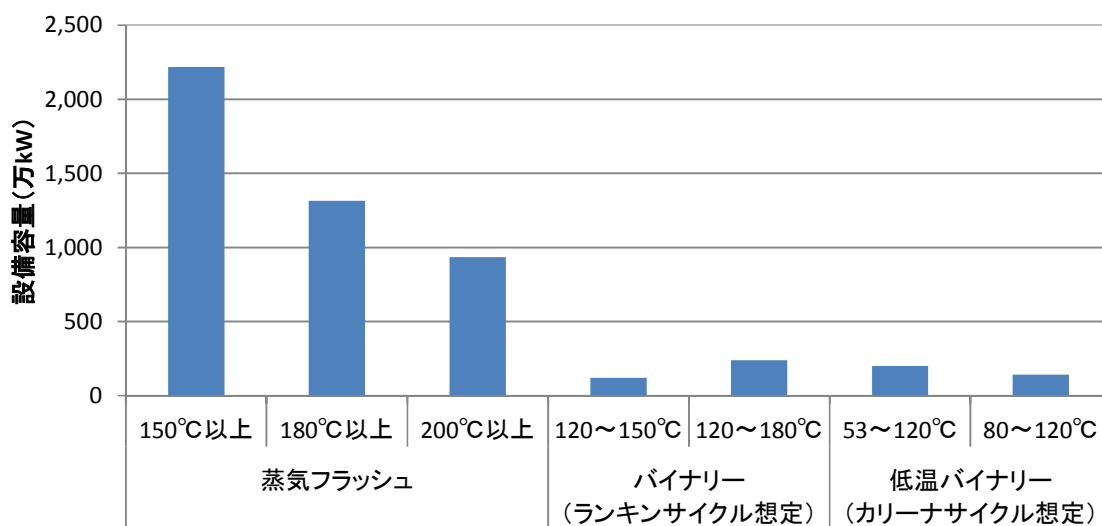
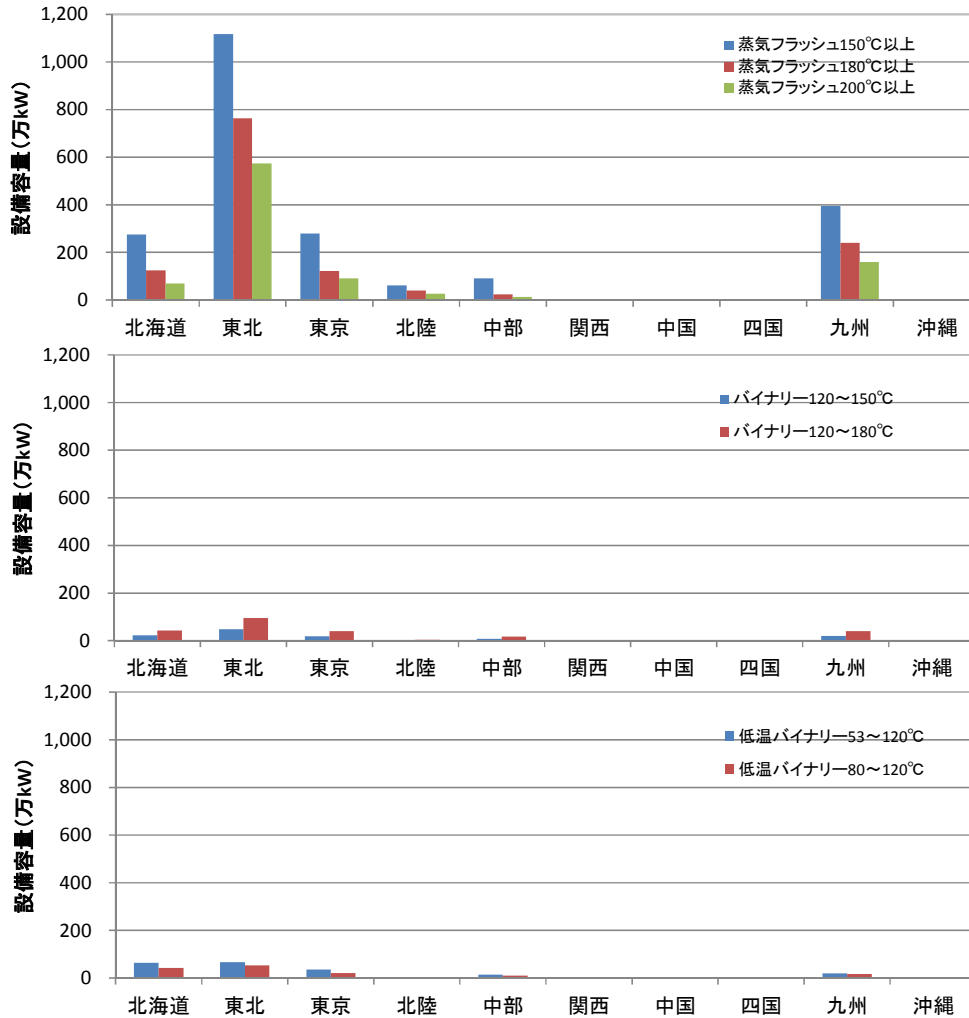


図 6.3-12 地熱資源量（全国）集計結果

2) 電力供給エリア別の地熱資源量分布状況

電力供給エリア別の地熱資源量集計結果を図 6.3-13 に示す。これによると地熱資源量は北海道、東北、九州電力管内に多く分布している。

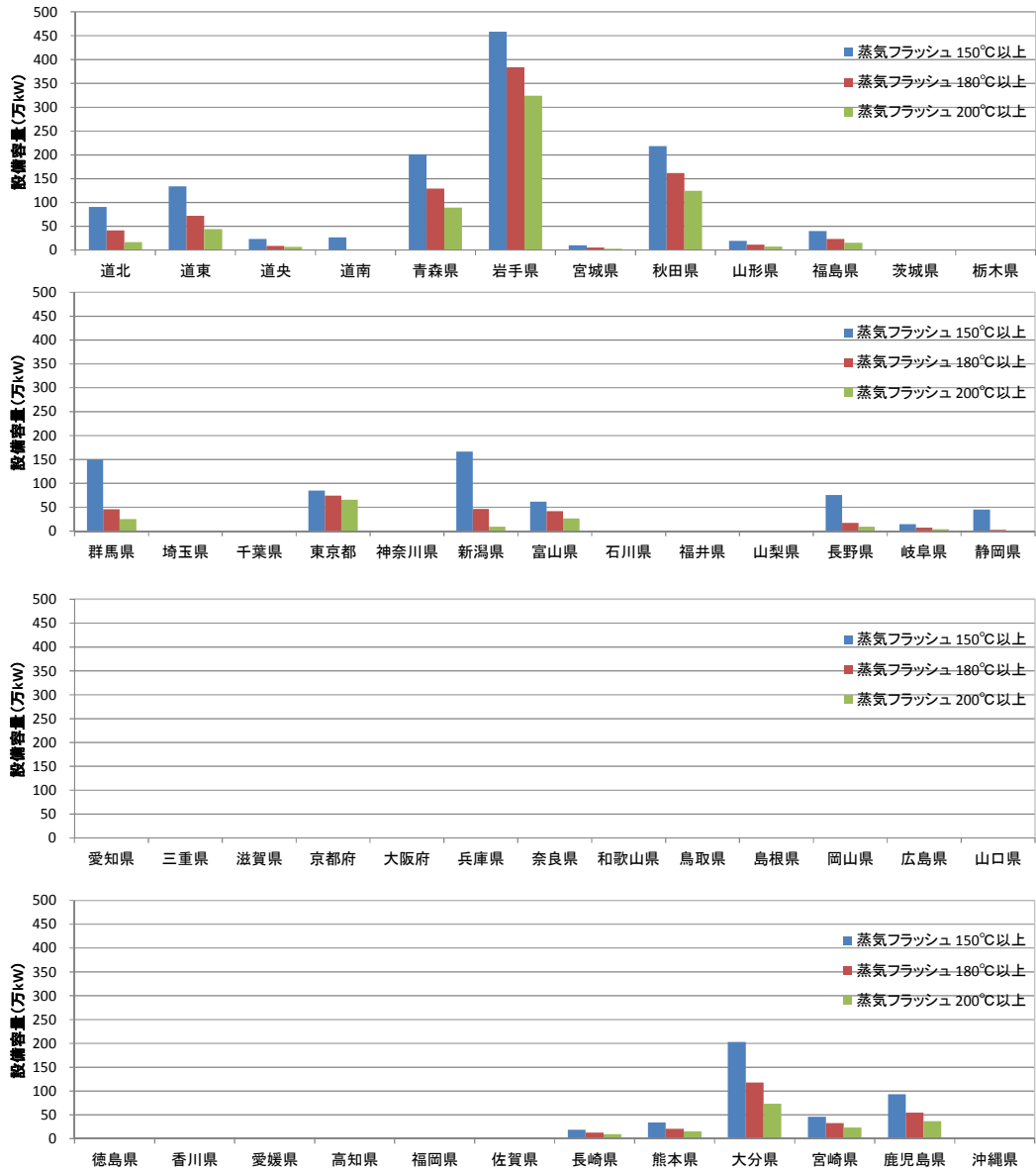


発電方式	対象温度区分	地熱資源量 (万kW)										
		全国	北海道	東北	東京	北陸	中部	関西	中国	四国	九州	沖縄
蒸気フラッシュ	150°C以上	2,219	276	1,116	280	62	90	0	0	0	395	0
	180°C以上	1,314	124	763	122	41	24	0	0	0	240	0
	200°C以上	933	69	574	91	27	13	0	0	0	160	0
バイナリー (ランキン サイクル想定)	120~150°C	120	23	48	19	1	8	0	0	0	20	0
	120~180°C	239	43	95	40	4	17	0	0	0	40	0
低温バイナリー (カーリー ナサイクル 想定)	53~120°C	199	63	66	36	1	13	0	0	0	20	0
	80~120°C	143	42	53	21	1	9	0	0	0	17	0

図 6.3-13 電力供給エリア別の地熱資源量分布状況

3) 都道府県別の地熱資源量分布状況

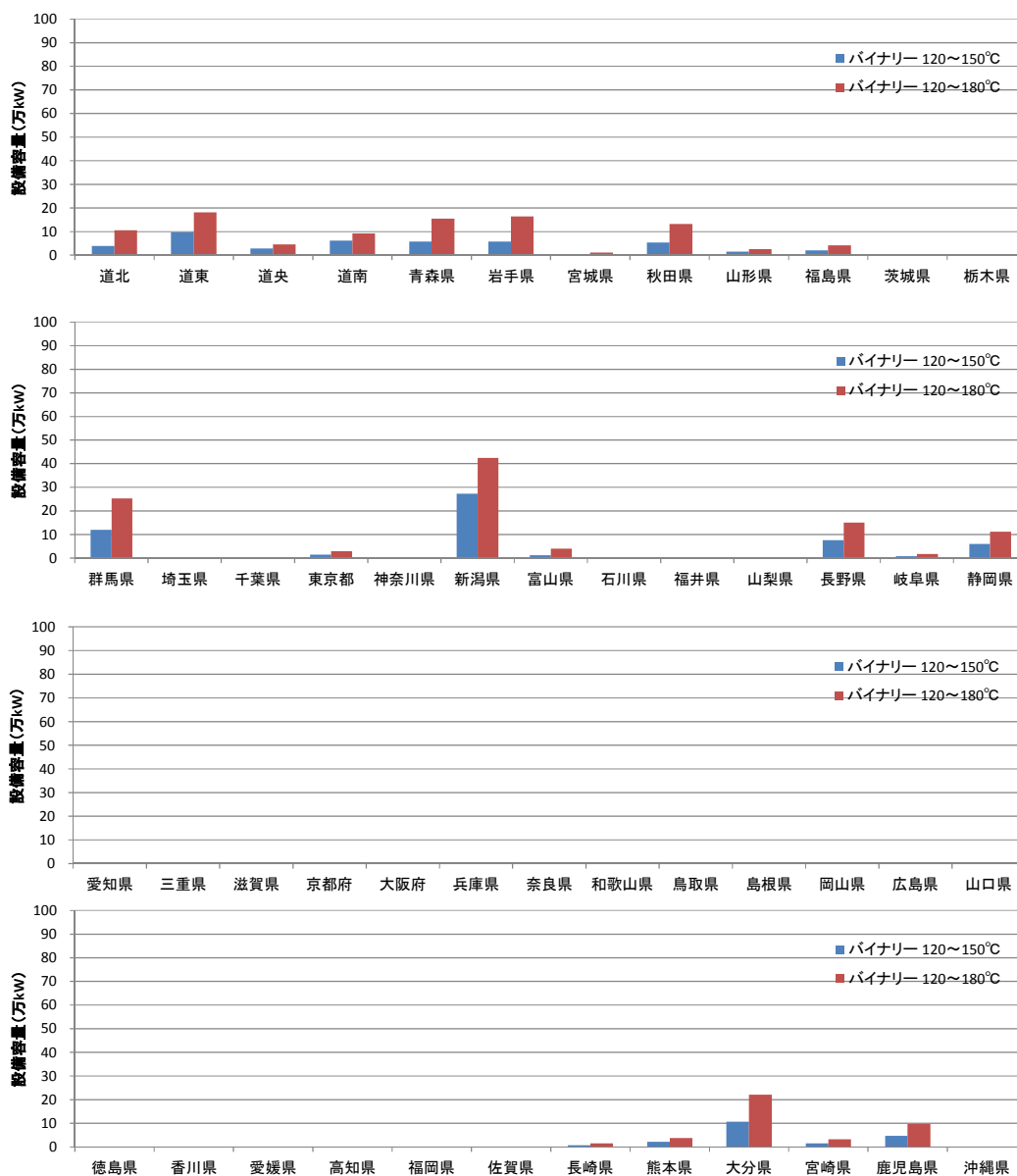
都道府県別の地熱資源量集計結果を図 6.3-14~16 に示す。これによると、地熱資源量（蒸気フラッシュ）は東北北部各県や新潟県、大分県などに多く分布していることがわかる。



対象温度区分	全国	道北	道東	道央	道南	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	茨城県	栃木県
蒸気フラッシュ 150°C以上	2,219	91	135	23	27	201	459	10	219	20	41	0	0
蒸気フラッシュ 180°C以上	1,314	41	72	9	1	130	384	6	162	12	24	0	0
蒸気フラッシュ 200°C以上	933	17	45	7	0	90	324	3	124	8	16	0	0
対象温度区分	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	新潟県	富山県	石川県	福井県	山梨県	長野県	岐阜県	静岡県
蒸気フラッシュ 150°C以上	150	0	0	85	0	166	62	0	0	0	76	14	45
蒸気フラッシュ 180°C以上	46	0	0	74	0	46	41	0	0	0	17	7	2
蒸気フラッシュ 200°C以上	25	0	0	66	0	9	27	0	0	0	9	4	0
対象温度区分	愛知県	三重県	滋賀県	京都府	大阪府	兵庫県	奈良県	和歌山県	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県
蒸気フラッシュ 150°C以上	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蒸気フラッシュ 180°C以上	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蒸気フラッシュ 200°C以上	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
対象温度区分	徳島県	香川県	愛媛県	高知県	福岡県	佐賀県	長崎県	熊本県	大分県	宮崎県	鹿児島県	沖縄県	
蒸気フラッシュ 150°C以上	0	0	0	0	0	0	0	19	34	203	46	93	0
蒸気フラッシュ 180°C以上	0	0	0	0	0	0	0	13	21	118	33	54	0
蒸気フラッシュ 200°C以上	0	0	0	0	0	0	0	10	16	74	24	37	0

図 6.3-14 地熱資源量（蒸気フラッシュ）集計結果

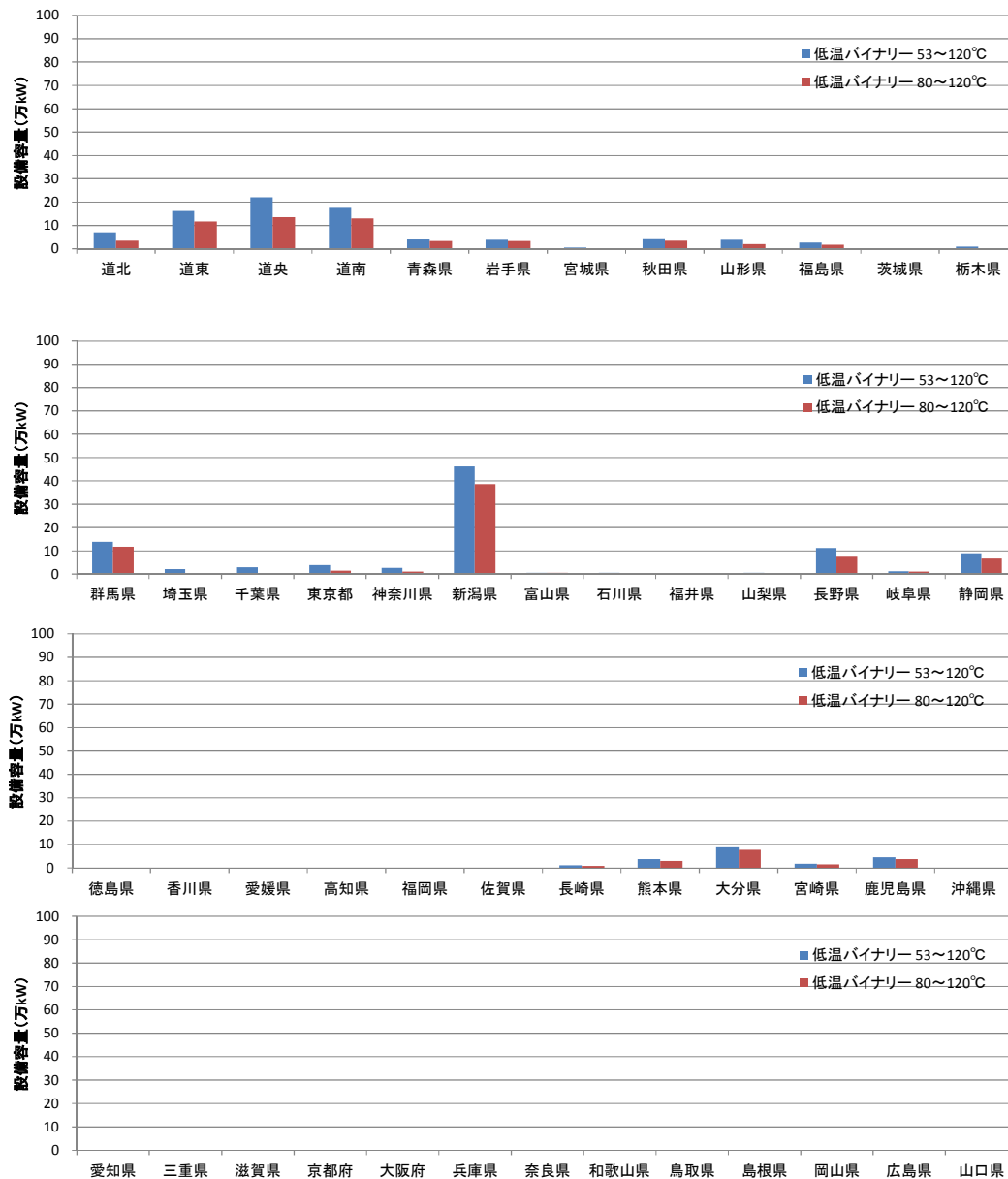
地熱資源量（バイナリー）は北海道、東北北部各県、新潟県、群馬県などに多く分布していることがわかる。



対象温度区分	全国	道北	道東	道央	道南	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	茨城県	栃木県
バイナリー 120~150℃	120	4	10	3	6	6	6	0	5	1	2	0	0
バイナリー 120~180℃	239	11	18	5	9	15	16	1	13	3	4	0	0
対象温度区分	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	新潟県	富山県	石川県	福井県	山梨県	長野県	岐阜県	静岡県
バイナリー 120~150℃	12	0	0	1	0	27	1	0	0	0	8	1	6
バイナリー 120~180℃	25	0	0	3	0	42	4	0	0	0	15	2	11
対象温度区分	愛知県	三重県	滋賀県	京都府	大阪府	兵庫県	奈良県	和歌山県	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県
バイナリー 120~150℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
バイナリー 120~180℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
対象温度区分	徳島県	香川県	愛媛県	高知県	福岡県	佐賀県	長崎県	熊本県	大分県	宮崎県	鹿児島県	沖縄県	
バイナリー 120~150℃	0	0	0	0	0	0	0	1	2	11	2	5	0
バイナリー 120~180℃	0	0	0	0	0	0	0	2	4	22	3	10	0

図 6.3-15 地熱資源量（バイナリー）集計結果

地熱資源量（低温バイナリー）は北海道、群馬県、新潟県に多く分布していることがわかる。



対象温度区分	全国	道北	道東	道央	道南	青森県	岩手県	宮城県	秋田県	山形県	福島県	茨城県	栃木県
低温バイナリー 53~120°C	199	7	16	22	18	4	4	1	4	4	3	0	1
低温バイナリー 80~120°C	143	4	12	13	13	3	3	0	4	2	2	0	0
対象温度区分	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県	新潟県	富山県	石川県	福井県	山梨県	長野県	岐阜県	静岡県
低温バイナリー 53~120°C	14	2	3	4	3	46	1	1	0	1	11	1	9
低温バイナリー 80~120°C	12	0	0	1	1	39	0	0	0	0	8	1	7
対象温度区分	愛知県	三重県	滋賀県	京都府	大阪府	兵庫県	奈良県	和歌山県	鳥取県	島根県	岡山県	広島県	山口県
低温バイナリー 53~120°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
低温バイナリー 80~120°C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
対象温度区分	徳島県	香川県	愛媛県	高知県	福岡県	佐賀県	長崎県	熊本県	大分県	宮崎県	鹿児島県	沖縄県	
低温バイナリー 53~120°C	0	0	0	0	0	0	0	1	4	9	2	5	0
低温バイナリー 80~120°C	0	0	0	0	0	0	0	1	3	8	2	4	0

図 6.3-16 地熱資源量（低温バイナリー）集計結果