

インドネシアの地熱資源

—とくに東部地域における今後の探査に関連して—

笹田 政 克¹⁾・高橋 正 明¹⁾

1. はじめに

インドネシアは世界有数の火山国であり、豊富な地熱資源を有する。同国では今世紀の前半より地熱に関心が持たれ、1920年代にすでにジャワ島で地熱の研究が行われた経緯がある。地熱開発の機運が世界的に高まった1960年代以降は、石油資源を有する同国では隣国のフィリピンのような急速な開発の道はとらなかったものの、ニュージーランドや我が国からの技術協力を得ながら着実に探査及び開発を進めた。それが1990年代にはいり、国内産業の隆盛に伴い電力供給不足の状況が生じたことと、21世紀に同国が石油の輸出国から輸入国になる見通しがでてきたため、国として地熱エネルギーの開発をこれまで以上に重点的に取り上げるようになった(Raja, 1995; Hulse, 1996)。

我が国からのインドネシアに対する技術協力は1980年代にスマトラ島ルンプール地域で1000m級の坑井調査を含むJICAプロジェクトが行われ、クリンチに掘削した坑井で蒸気3.5t/h、熱水17.3t/hが確認されている(国際協力事業団, 1983)。現在クリンチでは電力公社(PLN)による地域電化計画の中で0.3 MWの地熱発電が計画されている。また、カウンターパートの火山調査所(VSI)に供与されたリグは、その後スラウェシ島ラヘンドン等での地熱調査に活用されている。

我が国との間ではその後協力プロジェクトはなかったが、1994年及び1995年にインドネシア側から、東部の離島地域で地熱の探査開発に協力してほしいという要請がきている。この案件に関連して日本側では研究協力プロジェクトの可能性についての検討を行ってきており、その内容はエンジニアリング振

興協会(1994)、新エネルギー・産業技術総合開発機構(1995)の報告書にまとめられている。

2. 地熱の探査・開発と資源賦存量

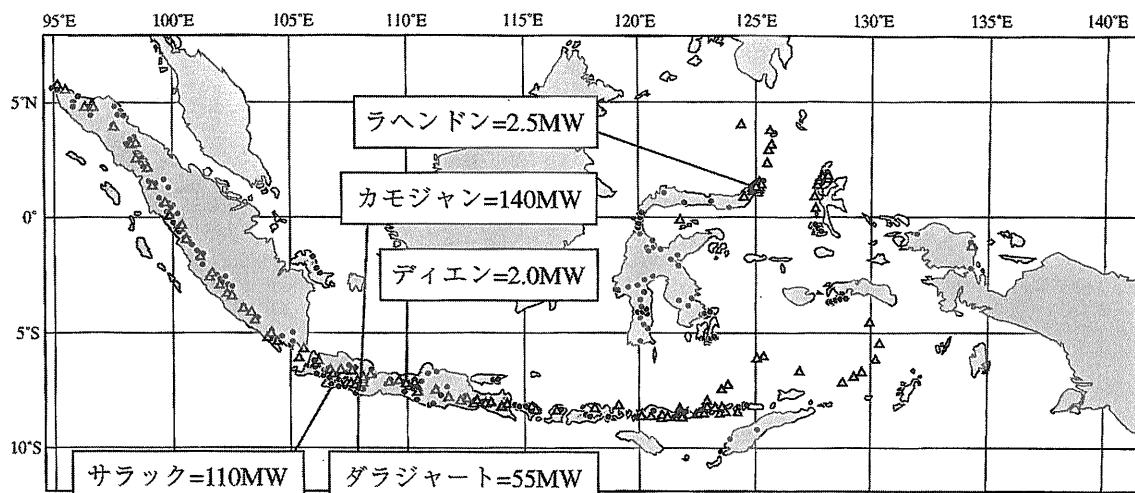
インドネシアで地熱資源の探査あるいは開発に携わっている機関には、火山調査所(VSI)、石油公社(Pertamina)及び電力公社(PLN)があり、これらはいずれも鉱山エネルギー省の傘下にある。また、技術開発面では技術評価応用庁が新技術の導入という観点から、地熱エネルギーの開発に関係している。これら多機関にわたる地熱エネルギーの開発を調整するため、各機関の地熱部門の代表等9名からなる地熱委員会が、1995年より鉱山エネルギー省に置かれている。

上述の4機関のうちで全国規模での地熱資源の探査及び評価を担当しているところはVSIであり、地熱の研究部門を有している。VSIにより80年代に行われた全国規模の調査では、217の地熱徴候地が抽出されている。これらの地熱徴候地のうちこれまでに地質調査が58地域で、物理探査が35地域、地化学探査が25地域でそれぞれ実施されており、その成果はインドネシアの地熱分布図(VSI, 1991)にまとめられている(第1図)。

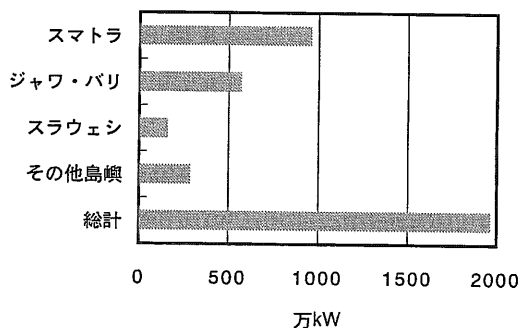
一方、開発の進んでいる地域のデータを含めてPertaminaにより地熱資源量の評価が行われている(Pertamina, 1995)。この資源評価は容積法により行われ、全国の地熱資源ポテンシャルとして電力換算で1,965万kWが算出されている(第2図)。この値を求めるにあたっては、地層からエネルギーの回収率を50%、熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率を10%といずれも高めの値を用いてい

1) 地質調査所 地熱熱部

キーワード：インドネシア、地熱資源、地熱探査、ヌサテンガラ、地域電化計画



第1図 インドネシアの地熱地域および地熱発電所(1995年現在).
 黒丸: 地熱徴候地(VSI, 1991), 三角: 火山(Neumann van Padang, 1951).
 地熱発電所はPertamina(1995)による.



第2図 インドネシアの地熱資源量(Pertamina, 1995)

るが, 利用できる地熱資源の温度の下限については180℃においでいる. また, 入力温度データおよび容積の算定については, 坑井での調査データのある探査・開発の進んでいる地熱地域以外では, 推定の度合いが大きい. 求められた値はこれらのことを勘案して読む必要があるが, かなり高いポテンシャルを有していることは間違いない.

インドネシア政府は自国にこのように膨大な地熱資源が賦存していることをよく認識しており, 開発を加速するための法令を施行してきている. 発電量の方も1994年から1995年にかけてジャワ島西部のサラック及びダラジャートの発電所が相次いで開業したため, それまでのカモジャン, ディエン, ラヘンドンに加え, 約2倍にあたる30.95万kWとなっている(第1図). さらに, 米国のユノカル社等の米国企業との

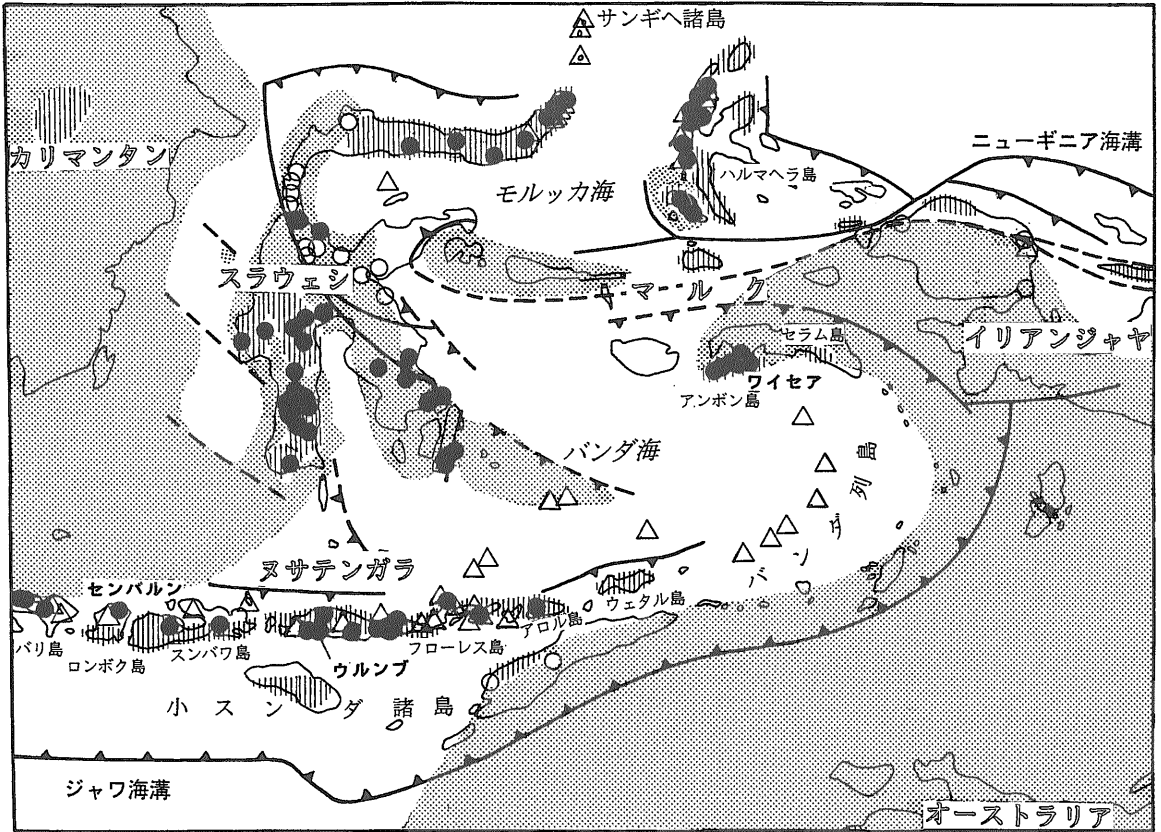
合併で, これらの地域での発電所の増設および新規地点での開発が計画されており, 今世紀末までに発電設備容量が100万kWに迫る勢いにある.

3. 火山活動の変遷とテクトニクス

インドネシアは活火山が129ある火山国であり, 鮮新世からのものも含めると火山の数は356にのぼる(横山ほか, 1978). これらの火山のほとんどは収斂するプレートの境界に沿って並んでおり, インド・オーストラリアプレートの沈み込みに伴い, スマトラからジャワ, パンダ列島に至る火山列が形成されているほか, モルッカ海周辺域では, いくつかのプレートの複雑な相互作用に関連した火山の分布がみられる(Hutchinson, 1982).

インドネシアの火山ではカルクアルカリ岩とカリウムに富むカルクアルカリ岩が卓越しており, 若干のソレイアイト, ショシヨナイト, リューサイトを斑晶にもつアルカリ岩を伴う(Hutchinson, 1975; Whitford et al., 1979; Wheller et al., 1987). 火山岩類の組成は沈み込み帯の深さと相関しており, より背弧側にアルカリに富む岩石が分布する. 一方地熱地域は火山フロントのカルクアルカリ岩質の火山の分布域とその分布は重複する.

さて, スマトラからジャワにかけての火山弧と, 鮮新世に活動が終わった火山弧であるスラウェシ西部



第3図 インドネシア東部の地熱徴候地と地質構造
 黒丸：開発有望な地熱徴候地および可能性のある地熱徴候地，白丸：その他の地熱徴候地 (VSI, 1991)，三角：火山 (Neumann van Padang, 1951)，縦線：第三紀火山岩類の分布域 (DPDE, 1991)，網かけ：大陸地殻の分布域 (Hamilton, 1979)，太字：PLNの地域電化計画による中小地熱開発地域。

では、古第三紀にまで遡る長い火山活動の歴史があるが、インドネシア東部のバンドラ弧では火山活動の歴史は鮮新世以降に限られている。スマトラ、ジャワ、西スラウェシでの古第三紀の火山岩類は古期安山岩類と呼ばれており (Bemmelen, 1970)、スマトラではこの中に白亜紀後期の凝灰岩類も含まれている。また、古期安山岩類以降、中新世にスマトラおよびジャワで火山活動が卓越していたことが、多くのフィッシュトラック年代により裏付けられており (Nishimura et al., 1978)、スラウェシ西部においても中新世にいくつかの地域で火山活動があったことが知られている (Leeuwen, 1979)。スマトラ、ジャワおよびスラウェシ西部は中新世まで一連の島弧をつくっていたが、小さな大陸ブロックの衝突によりスラウェシが大きく回転し、沈み込み帯から遠ざかったものと考え

られている (Nishimura and Suparka, 1990)。スラウェシ西部では鮮新世で火山活動が終息するため、スマトラ、ジャワに比較して地熱のポテンシャルは低いといえる (第3図)。

一方、スラウェシ西部の回転移動後に、新たな沈み込み帯に関連して小スンダ諸島およびバンドラ諸島の火山岩類が形成されている (第3図)。小スンダ諸島からバンドラ弧にかけての地域の構造発達史をみると、小スンダ諸島はインド・オーストラリアプレートの沈み込みに関連して、中新世以降海洋性地殻上に火山列島として成長したが、鮮新世の300万年前頃に、アロール島以東でインド・オーストラリアプレート上にあるオーストラリアの大陸性地殻が衝突をおこし、大陸性物質の混入したマグマが発生した (Hamilton, 1979; Hutchinson, 1982)。これがアンボナイト

と呼ばれる堇青石デイサイトで、アンボン島、ウエタル島等に分布する。この衝突によりアロル島以東では沈み込みの状況が大きく変化し、小スンダ諸島の西部から中央部の島々では300万年以降も火山活動がほぼ同じ場所で継続したのとは対比的に、アロル島以東では火山活動の位置が北にずれるとともに、明瞭な海溝の存在が認められなくなっている(西村・Arsadi, 1984)。また大陸性地殻の衝突の影響は火山島の隆起を促進し、小スンダ諸島では隆起した島の削剥がかなり進行している。その中でウエタル島等では鮮新世の閃緑岩質から花崗閃緑岩質の貫入岩類が地表に露出しており、周辺に熱水変質も認められる。これらの貫入岩類の現在の熱的ポテンシャルは高くないが、海洋島に発達する地熱系の熱源をモデル化する上で参考になるところが多いと考えられる。なお、地熱地域として注目されている地域の1つであるアンボンについては、Wallace (1890)により17世紀及び18世紀の噴火記録が述べられているが、その後の地質学の文献にはそれに対応する記述が見つからない。ただ周辺の海域の火山岩で75万年の年代測定結果が出されている(Silver et al., 1985)。

4. 開発が期待されている東部の地熱地域

インドネシア東部のロンボク島からアロル島にかけての、主として火山島からなるヌサテンガラ地域、バンドラ諸島、アンボン島、セラム島、ハルマヘラ島等を含むマルク地域、それにスラウェシ地域等は、現在 PLN による地域電化計画(Rural Electrification)の主な対象となっており、小規模水力、太陽光、風力とともに地熱エネルギーによる地域電化事業が計画されている。

PLN による地域電化計画は主に世界銀行からの借款で賄われており、1992年に無電化地域への給電のための第1期のプロジェクトがスタートし、1994年からは第2期にはいっている。地熱に関しては中小地熱(Mini-geothermal)プロジェクトで、フローレス島のウルンプ(3MW)、アンボン島のワイセア(5MW)、ロンボク島のセンバルン(5MW)が開発の対象となっている。このうちフローレス島ではすでにいくつかの探査手法を導入したプレフィージビリティスタディが進行中である。また、ここでは坑井を用い

た調査も計画されている。

インドネシア東部の地熱地域を、地質構造及び火山との関連でみると、(1)スンダ弧、バンドラ弧、ハルマヘラ、サンギヘからスラウェシ北部の活火山列に多くのものが分布するほか、(2)鮮新世で火山活動が終息したスラウェシ西部等、(3)現在火山活動はないが、多くの断層の発達しているスラウェシ東部にその分布が認められる(第3図)。

(1)については更新世から現世にかけての火山活動との関係で、その熱源を説明することが可能である。(2)の現在火山活動のないスラウェシ西部は、前述したように地熱のポテンシャルはそれほど高くはないものと考えられる。なお、同地域の安山岩および玄武岩では6.99-9.29MaのK-Ar年代が得られている(Hehuwat, 1976)。また、小スンダ諸島でも鮮新世で火山活動の終息したアロル島やバンドラ弧の延長部ではあるが鮮新世の火山岩類で被われているアンボンおよびその周辺についても、熱源に対応する火山活動の証拠を地表に求めることが困難である。

これら(1)および(2)は海洋島(あるいは海岸地帯)に存在する火山性あるいは準火山性の地熱資源であり、たとえば日本の山川あるいは八丈島の地熱系と同様の貯留層形成機構であることが考えられる。ただし、火山の規模あるいは火山の年令(活動状況)を反映して、地熱系の形成機構が変化する(高橋, 1994)ことが考えられるので、インドネシア東部の地熱系に日本の海洋島(あるいは海岸地帯)のモデルを適用する場合には十分な注意が必要である。また、海洋島と一口に言っても、幅50km以上もある大きな島に発達している地熱地域も多いので、貯留層形成機構への海洋の影響の違いも考慮する必要がある。

(3)のスラウェシ東部は構造的にアクティブなところである。2つの大陸地殻の小ブロックが東からと南東側から衝突している状況にあり、それらのマイクロプレートの動きに関連して、横ずれ断層等が縦横に発達している。ここでは地熱地域に火山活動に関連した熱源が認められないことから、たとえばタイ北部(Sasada et al., 1987)のような断層系に関連した天水の深部循環により熱水系が形成されている可能性が考えられる。

5. おわりに

以上、インドネシアにおける地熱資源の賦存状況および探査・開発体制について概要を述べるとともに、特に東部地域の地熱資源については、平成6年度に新エネルギー・産業技術総合開発機構で行った地熱探査技術研究協力のFSで検討した結果及び文献に基づき検討を加えた内容について述べた。これらは1996年2月2日の第241回地質調査所研究発表会「インドネシアにおける資源・災害・テクトニクス」で講演したものである。当日は国際協力室脇田浩二氏からテクトニクスに関しての有益なコメントを頂いた。また、地殻熱部村岡洋文氏には原稿を読んで頂き、いくつかの有益な助言を頂いた。以上の方々に感謝の意を表する次第である。

文 献

- Bemmelen, R.W. (1970) : The Geology of Indonesia, Vol. 1A : General Geology of Indonesia, Martinus Nijhoff, The Hague.
- Departemen Pertambangan Dan Energi (1991) : Atlas Informasi Dasar Pengembangan Pertambangan Dan Energi Indonesia Bagian Timur, Sekala 1 : 5,000,000.
- エンジニアリング振興協会 (1994) : 地熱エネルギー利用技術の移転に関する調査研究—インドネシア共和国についてのケーススタディー報告書, ENAA1993-ブ7, 161p.
- Hamilton, W. (1979) : Tectonics of the Indonesian region. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1078, 345p.
- Hehuwat, F. (1976) : Isotopic age determinations in Indonesia: the state of the art. In proceedings of the Seminar on Isotopic Dating, Bangkok, May 1975, CCOP, UNDP, Thailand, 135-157.
- Hulse, D.L. (1996) : Geothermal energy—Indonesia's alternative of choice. Bull. Geotherm. Resour. Council, 25, 13-18.
- Hutchinson, C.S. (1975) : Correlation of Indonesian active volcanic geochemistry with Benioff zone depth. *Geologie en Mijnbouw* 54, 157-168.
- Hutchinson, C.S. (1982) : Indonesia, in Thorpe, R.S. Edited "Andesites, Orogenic andesites and related rocks". 207-224.
- 国際協力事業団 (1983) : インドネシア共和国ルンブール地熱地域開発計画調査報告書 (第3次) 要約.
- Leeuwen, Th. M. van (1979) : The geology of southwest of Sulawesi with special reference to the Biru area. In Proceedings of a Workshop Eastern Indonesia, Bandung, July, 1979.
- Neumann van Padang, M. (1951) : Catalogue of active volcanoes of the world including solfatara, Part 1 INDONESIA. International Volcanological Association.
- Nishimura, S., Sasajima, S., Hirooka, K., Thio, K.H. and Hehuwat, F. (1978) : Radiometric ages of volcanic products in Sunda Arc. In *Studies of Physical Geology in the Sunda Island Arc* (S. Sasajima ed.), Kyoto University Press, Kyoto, 34-37.
- Nishimura, S. and Suparka, S. (1990) : Tectonics of East Indonesia. *Tectonophysics*, 181, 257-266.
- 西村 進・Arsadi, E.M. (1984) : 東インドネシアのテクトニクス(1)—パンタル島とアロール島との間の不連続. 九十九地学, 第19号, 11-20.
- Pertamina (1995) : Indonesia Geothermal Reserves and Resources. Pertamina, 45p.
- Prijoesilo, P., Sunarya, Y. and Wahab, A. (1993) : Recent progress of geological investigations in Indonesia. *Jour. of Southeast Asian Earth Sciences*, Vol. 8, 2-23.
- Raja, V.T. (1995) : The role of geothermal energy in the context of the future electric power supply in Indonesia. *Proc. WGC1995*, 173-190.
- Sasada, M., Chaturongkawanich, S., Soponpongpipat, P., Obara, K., and Ochi, M. (1987) : Structural control of the hot springs of the northern Thailand based on the analysis of Landsat imagery. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 38, 1-6.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1995) : 平成6年度地熱探査技術の海外共同実証研究可能性調査. NEDO-P-9454, 159p.
- Silver, E.A., Gill, J.B., Schwartz, D., Prasetyo, H. and Duncan, R.A. (1985) : Evidence for submerged and displaced continental borderland, North Banda Sea, Indonesia. *Geology*, 13, 687-691.
- Volcanological Survey of Indonesia (1991) : Map of localities geothermal fields in Indonesia, ed. by Effendi, A.D., Volcanological Survey of Indonesia.
- 高橋正明 (1994) : 化学的に見た第四紀火山と熱水系との関係—なぜ高塩濃度と低塩濃度の熱水系が存在するのか—. 地質学論集 No.43, 156-168.
- Wallace, A.R. (1890) : The Malay Archipelago: The Land of the Orang-Utan, and the Bird of Paradise. A Narrative of Travel with Studies of Man and Nature (新妻昭夫訳「マレー諸島」ちくま学芸文庫, 1993, 上下2冊)
- Wheller, G.E., Varne, R., Foden, J.D. and Abbott, M.J. (1987) : Geochemistry of Quaternary volcanism in the Sunda-Banda Arc, Indonesia, and three component genesis of island-arc basaltic magmas. *Jour. Volcan. Geotherm. Res.*, 32, 137-160.
- Whitford, D.J., Nicholls, I.A. and Taylor, S.R. (1979) : Spatial variations in the geochemistry of Quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contr. Mineral. Petrol.*, 70, 341-356.
- 横山 泉, 荒牧重雄, 中村一明 (1978) : 火山. 岩波講座「地球科学」7.
- SASADA, Masakatsu and TAKAHASHI Masaaki. (1996) : Geothermal resources in Indonesia with special reference to future explorations in its eastern part.

< 受付 : 1996年3月26日 >