

20. モンゴルの電力生産による水需要の時系列分析

岡寺 智大^{1*}・王 勤学¹・エリデニ¹・Ochirbat Batkhishig²

¹ 国立研究開発法人国立環境研究所地域環境研究センター（〒305-0816 茨城県つくば市小野川16-2）

² Institute of Geography, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 210620, Mongolia

* E-mail: okadera@nies.go.jp

モンゴルでは気候変動の影響による水資源の脆弱性が指摘されている。また、急激な経済成長に伴い電力需要が増加し、その多くは国内発電基盤で賄われている。発電には大量の水を要し、水資源の脆弱化が懸念されるモンゴルにおいて、電力生産に伴う水需要の把握が重要となる。そこで、本研究では、ボトムアップ手法によりモンゴルの電力生産による水需要量を算定し、過去50年の時系列分析を行った。その結果、モンゴルでは過去50年で発電による水需要量が約39倍に増加しており、総じて石炭火力のシェアが高いものの、近年、水力発電の割合が増えており、水依存度が高まっている事が明らかとなった。

Key Words : power generation, water demand, long-term analysis, bottom-up approach

1. はじめに

モンゴルは年平均降水量が87~320mm¹⁾の乾燥地域に属する国であり、近年、気候変動による永久凍土の溶解により水資源の脆弱性が指摘されている²⁻⁴⁾。同時に、急速に経済成長が進んでおり、直近5年のGDP成長率は年平均42%にもなる^{5, 6)}。同時に、電力消費量も急増しており、直近5年で年平均14%の成長率となる⁷⁾。

また、モンゴルの供給電力の9割以上は国内の発電基盤により賄われている⁷⁾が、発電には大量の水が必要となり、モンゴルの工業用水の7~8割に相当する水が使用されている^{8, 9)}といわれている。また、今後もエネルギー需要の増加が予想されるため、水資源の弱体化が懸念されるモンゴルにおいて、電力生産に伴う水需要の把握が重要と考えられる。

そこで本研究では、電力生産に伴う水需要量の算定手法を開発し、モンゴルの既存の発電システムの取水量および水消費量の経年変化を評価する。以後、本稿においては、算定手法の詳細を説明し、結果および考察を紹介した後、結論および今後の課題について取りまとめる。

2. 手法

(1) 電力生産に要する水

電力はタービンの回転により発電機を稼働する事で生

産され、タービンの動力としてプロセス水が利用されており、水の形態により2種類に分類される。まずは水力発電で、これはプロセス水の位置エネルギーおよび運動エネルギーを利用してタービンを回転させる。

2つ目は火力発電で、これはプロセス水を化石燃料、原子力、バイオマス、地熱および太陽光等で加熱し、気化した水蒸気の運動エネルギーでタービンを回転させる。また、役目を終えた水蒸気は、冷却し液化する事でプロセス水として再利用している。そのため、生産プロセス稼働後にプロセス水が再度必要となることはないが、一般的に液化のために冷却水の取水が必要となる¹⁰⁾。その他、排ガス中の大気汚染物質の除去や二酸化炭素の固定等により水を要する事がある¹¹⁾。

発電に要する水需要は、取水量および水消費量のいずれか、もしくは両者により評価される¹²⁻¹⁵⁾。取水量は河川、地下水、ダム等から発電施設に取水される量であり、水力発電所のプロセス水や、火力発電所の冷却水等が該当する。一方、水消費量は発電する過程で蒸発等により消耗した水量を指し、水力発電用ダムや、火力発電所の冷却塔からの蒸発水が該当する。

(2) 電力生産による水需要量の算定

電力生産による水需要量は、発電量に発電量あたりの水需要係数を乗じる積上型手法で求められる^{14, 16, 17)}。また、発電に用いる原料により、プロセス水や冷却水の必

要量は異なり、発電による水需要量(wd)は式(1)から求まる。

$$wd_{(n)} = \sum_k wp_{(n,k)} \times pg_{(k)} \quad (1)$$

ただし、wp：発電量あたりの水需要係数、pg：発電量、n：取水および水消費、k：発電に用いる原料種。

(3) モンゴルの発電量の推計

a) モンゴルの発電量データ

モンゴルでは、電力収支表から年間発電量を1989年から入手可能だが、燃料種毎の発電量は公開されていない⁷⁾。燃料種別発電量については、国際エネルギー機関のデータベース（IEAS）から1990年以降の石炭および石油火力の総発電量¹⁸⁾を、米国エネルギー情報局の国際統計（IES）から1980年以降の火力、風力および太陽光の純発電量¹⁹⁾が入手可能であるが、両者共に水力発電の情報が不足している。また、モンゴルエネルギー統制委員会発行の電力統計指標²⁰⁾では、火力、水力、太陽光、風力および太陽光・風力複合発電所（ハイブリッド発電所）の発電量が記載しており、発電所によっては1970年代からデータの取得が可能であるが、一部の発電所のデータしか得る事が出来ない。また、世界発電所データベース（WEPPD）²¹⁾では、モンゴル国内の134の発電ユニットの原料種（石炭、石油、水力、太陽光、風力）を入手が可能であるが、各ユニットの発電容量は入手できるものの発電量そのものは入手する事が出来ないのに加え、データの信頼性を発行元が補償していない。

b) モンゴルの発電量の算定

上述の通り、モンゴルの発電データは一長一短があるが、モンゴル国内の発電所を最も網羅しているWEPPDでは、原料種別（石炭火力、石油火力、水力、太陽光、風力）に各発電ユニットの発電容量、操業開始年、操業停止年が入手出来る事から、式(2)からモンゴルの原料種別年間発電量($pg_{(k,y)}$)を推計する。

$$pg_{(k,y)} = gc_{(k,y)} \times at_{(y)} \times cf_{(k,y)} \quad (2)$$

ただし、gc：発電容量、at：年間稼働可能時間（8,760もしくは8,784時間）、cf：設備利用率、y：年。

c) データおよび仮定

各年の発電容量は操業開始年から操業停止年までは変更がないものと仮定した。また、電力統計指標とWEPPDの比較の結果、石炭火力、水力、太陽光、風力の一部に欠損があることが判明したため、モンゴルの専門家へのヒアリング等により発電容量データの更新を行った。また、ハイブリッド発電所は該当発電所の報告書²²⁻²⁴⁾を参照し、太陽光と風力の発電容量を推計した。

設備利用率は、電力統計指標に記載されている発電所は報告値を引用した。また、電力統計指標に記載されていない発電所については、IEASおよびIESから発電量の

表-1 原料種別発電量あたり水需要係数（L/MWh）

	水消費	取水量
石炭火力	1,469	41,088
石油火力	1,557	44,310
水力	27,439	1,086,142
風力	0	0
太陽光パネル	0	0

入手が可能な1990年以降を対象として、WEPPDから原料種別最大発電可能量を算定し、石炭火力、石油火力、太陽光および風力の設備利用率を求めた。

水力に関しては2012年の発電量の報告値²⁵⁾とWEPPDから求まる最大発電可能量から、2012年の設備利用率は20%とした。また、報告値から得られたモンゴルの水力発電は全発電量の1%であるという知見と、WEPPDの全発電容量にしめる水力発電の割合に基づき、1990年以降、水力発電の設備利用率は11%～20%で変動するものとした。

1990年以前の設備利用率は、火力発電所については、電力統計指標に記載されている火力発電所と同様の変動をするという仮定おき、1973年までの設備利用率を設定した。それ以外の発電所については、遡る事が可能な直近10年分の平均値を設備稼働率とした。

(4) 原料種別発電量あたりの水需要係数

モンゴル国内の発電所の取水および水消費量等の知見が入手出来なかったため、既存研究の報告値^{26, 27)}を同定する事で、発電量あたりの水需要係数を設定した（表-1）。尚、火力発電所の冷却方式、大気汚染物質の除去、二酸化炭素固定技術の導入の有無によって、水需要係数は異なると予想される。しかしながら、WEPPDで該当する情報に欠損が多く信頼性が担保できてない事と、既存研究の水需要係数の精緻化が困難であることから、本稿ではモンゴルでは冷却方式等の違いはないと仮定した。

3. 結果

(1) モンゴルの電力生産に要する取水量

モンゴルの電力生産に要する取水量は、1964年には585万m³であったが、2014年には2億2,744万m³となり（図-1）、この50年間で39倍に増えている。また、年成長率の平均値は9%（中央値4%）となり、1970年代半ばから1980年代後半、および2000年代後半からの成長率が顕著であるが、2012年を境に減少に転じている。

また、1960年代半ばから総じて石炭火力発電による取水量が9割強を占めている。しかしながら、2009年から水力発電の占める割合が増えて、2014年現在、石炭火力

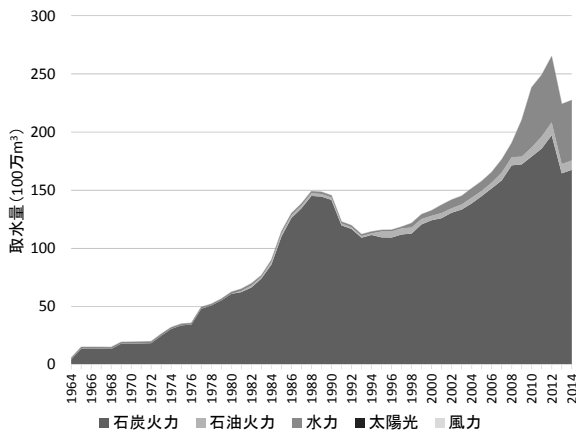


図-1 モンゴルの発電による取水量の推移。

の割合は74%にまで減少している。

(2) モンゴルの電力生産に要する水消費量

モンゴルの電力生産による水消費量は1964年には19万 m^3 であったが、2014年には758万 m^3 にまで増加しているとの結果が得られた（図-2）。また、平均的に年間9%程度で増加しており、特に1970年代半ばから1980年代後半、および2000年代後半にかけての増加が顕著である。

また、総じて石炭火力発電による水消費が多く、平均的に全水消費量の94%を占めている。しかし、2009年から水力発電の割合が増加したことで、2014年現在、8割弱程度となっている。

4. 考察およびまとめ

モンゴルでは電力生産により水需要量が顕著に増加しているとの結果が明らかとなった。しかし、同時に社会

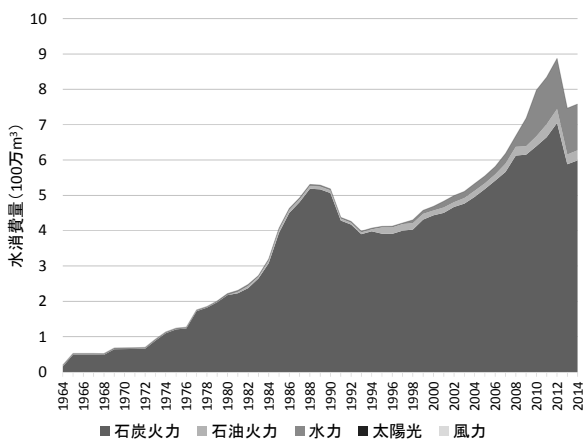


図-2 モンゴルの発電による水消費量の推移。

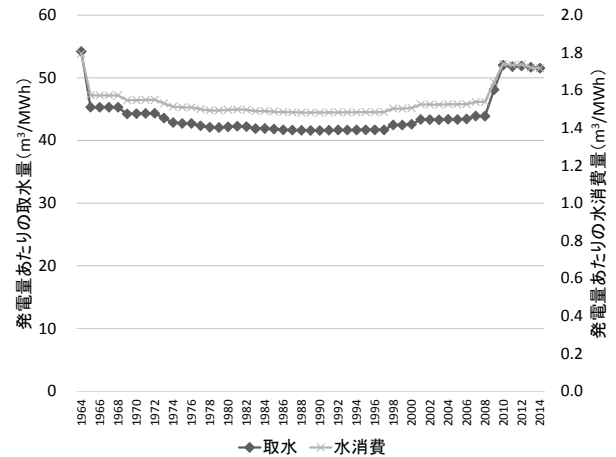


図-3 モンゴルの発電量あたりの水需要量の推移。

経済を支える電力生産量も増えていることから、モンゴルの発電基盤の水依存度（発電量あたりの取水量および水消費量）の推移を図-3に示す。

モンゴルの発電量あたりの取水量は、ここ50年間で42～54 m^3/MWh の間で推移しており、1965年からは43 m^3/MWh 前後で推移してきたが、2008年を境に急増し、2014年の発電量あたりの取水量は52 m^3/MWh となっている。また、同時期の発電量あたりの水消費量は、1.5～1.8 m^3/MWh の間で推移しており、発電量あたりの取水量と同様の変化を示しており、近年、モンゴルの発電基盤の水依存度は高まっていると考えられる。

また、モンゴルの該当期間の年平均降水量は91～140mmの間で変動しており、かつ、減少傾向にある²⁸⁾。そのため、近年の電力生産の水依存度の増加傾向は好ましいとは言えない。しかしながら、156万 km^2 の広大な領土面積⁹⁾を持つモンゴルでは、降水だけで年間1,425～2,190億 m^3 の水資源が得られる計算となり、モンゴル全体で見ると、電力生産の水依存度の増加が水資源に与える影響は極めて小さいといえる。

しかしながら、モンゴルの降水量の分布は均一ではなく²⁸⁾、土地の乾燥度にも地域的な偏りが存在する²⁹⁾事が明らかとなっており、水利用可能量は降水量だけでなく、蒸発散率等の地域特性により大きく異なると考えられる。同時に、モンゴルの人口や発電所もウランバートル等の一部の地域に集中^{6) 21)}しており、電力生産および消費構造そのものにも地域差が生じている。そこで、電力起因の水需要と水供給機能の地域差を考慮した水需給制約に基づいた評価手法への高度化が今後の課題となる。

謝辞：本稿は環境省「二国間クレジット（JCM）推進のためのMRV等関連するモンゴルにおける技術高度化事業」の成果の一部をとりまとめたものである。

参考文献

- 1) National Statistical Office of Mongolia: *Mongolian Statistical Yearbook 2010*, National Statistical Office of Mongolia, Ulaanbatar, pp., 2011.
- 2) Wu, T., Wang, Q., Watanabe, M., Chen, J., and Battogtokh, D.: Mapping vertical profile of discontinuous permafrost with ground penetrating radar at Nalaikh depression, *Mongolia. Environmental Geology*, Vol. 56, pp. 1577-1583, 2012.
- 3) Wu, T., Zhao, L., Li, R., Wang, Q., Xie, C., and Pang, Q.: Recent ground surface warming and its effects on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau, *International Journal of Climatology*, Vol. 33, pp. 920-930, 2013.
- 4) Wu, T., Wang, Q., Zhao, L., Du, E., Wang, W., Batkhishig, O., Battogtokh, D., and Watanabe, M.: Investigating internal structure of permafrost using conventional methods and ground-penetrating radar at Honhor basin, Mongolia, *Environmental earth sciences*, Vol. 67, pp. 1869-1876, 2012.
- 5) National Statistical Office of Mongolia: *Mongolian Statistical Yearbook 2012*, National Statistical Office of Mongolia, Ulaanbatar, pp., 2013.
- 6) National Statistical Office of Mongolia: *Mongolian Statistical Yearbook 2013*, National Statistical Office of Mongolia, Ulaanbatar, pp., 2014.
- 7) National Statistical Office of Mongolia: Mongolian Statistical Information Service. 2014 [Accessed 25 Sep., 2014]; Available from: <http://www.1212.mn/en/>
- 8) Yadamssoo, T.: Water management in the Mongolian mining industry, *2nd Water Management Seminar*, Pacific Economic Cooperation Council, Noumea, 2008.
- 9) Okadera, T.: Water for energy production in Mongolia, *International workshop on Adaptation for Climate Change and Green Development in Mongolia*, Chuo University, Tokyo, 2015.
- 10) Kohli, A. and Frenken, K.: Cooling water for energy generation and its impact on national-level water statistics, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2011.
- 11) National Energy Technology Laboratory: Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity Revision 2a, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA, 2013.
- 12) Rio Camillo, A.M. and Frei, C.: Water: a key resource in energy production, *Energy Policy*, Vol. 37(11), pp. 4303-4312, 2009, (English).
- 13) Gleick, P.H.: Water and energy, *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 19, pp. 267-299, 1994, (English).
- 14) Sovacool, B.K.: Running on empty: the electricity-water nexus and the US electric utility sector, *Energy Law Journal*, Vol. 30(1), pp. 11-51, 2009.
- 15) Gerbens-Leenes, P.W., Hoekstra, A.Y., and van der Meer, T.: The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply, *Ecological Economics*, Vol. 68(4), pp. 1052-1060, 2009, (English).
- 16) Sovacool, B.K. and Sovacool, K.E.: Identifying future electricity-water tradeoffs in the United States, *Energy Policy*, Vol. 37(7), pp. 2763-2773, 2009, (English).
- 17) Sovacool, B.K. and Sovacool, K.E.: Preventing national electricity-water crisis areas in the United States, *Columbia Journal of Environmental Law*, Vol. 34(2), pp. 333-393, 2009.
- 18) International Energy Agency: IEA Statistics. 2014 [Accessed December 15, 2014]; Available from: <http://www.iea.org/statistics/>.
- 19) U.S. Energy Information Administration: International Energy Statistics. 2014 [Accessed December 15, 2014]; Available from: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm>.
- 20) Energy Regulatory Commission of Mongolia: *Power Force Statistic Indicator 2010*, Energy Regulatory Commission of Mongolia, Ulaanbaatar, pp., 2011, (Mongolian).
- 21) Platts: World Electric Power Plants Database September 2014, New York, 2014.
- 22) EBARA Hatakeyama Memorial Fund: Renewable Energy Hybrid System, *Short Course on EFFECTIVE ENERGY SYSTEMS*, Ebara Hatakeyama Memorial Fund, Tokyo, 2014.
- 23) Purevbayar, D.: Renewable Energy Development of Mongolia, *SREP Pilot Countries Meeting*, Climate Investment Funds, Istanbul, 2012.
- 24) Jinsoo, S., Jeong Chul, L., Jae Ho, Y., Seok Ki, K., Hong Woo, K., Kyung Hoon, Y., Man Il, K., Jung Hoo, H., Seok Hyng, L., Enebish, N., and Agchbayar, D.: Performance evaluation of PV-wind hybrid power generation system at Gobi-desert area, *Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE*, 2005.
- 25) МОНГОЛ УЛСЫН ЭРЧИМ ХҮЧ ИЙД ЯАМ: Монгол улсын цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэртэл (2012 он). 2013 [Accessed 27 Apr., 2014]; Available from: <http://energy.gov.mn/c/89>.
- 26) Okadera, T.: Water Requirements for Power Supply in Mongolia, *Proceedings of Environmental Information Science*, Vol. 28, pp. 125-130, 2014, (Japanese).
- 27) Electric Power Research Institute and U.S. Department of Energy: Renewable Energy Technology Characterizations, *EPRI Topical Report, December 1997*, DeMeo, E.A. and Galdo, J.F., Editors, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1997.
- 28) Japan Meteorological Agency: JRA-55 – the Japanese 55-year Reanalysis. 2015 [Accessed 16 July, 2015]; Available from: http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html.
- 29) Wang, Q., Okadera, T., Watanabe, M., and Yan, W.: Environmental Vulnerabilities and their Adaptation Strategies in Mongolia, *The 4th Asia-Pacific Climate Change Adaptation Forum*, Asia-Pacific Adaptation Network, Kuala Lumpur, pp. 117-118 2014.