

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 オタ ケダル (Otta Kedar)

火力発電所では、サイクルで発生する蒸気を冷却するために大量の水が利用されている。冷却水の需要量は、冷却システムごとに異なる冷却効率と水源の水温とに大きく左右され、気候変動に伴い水温が上昇すると蒸気と冷却水の温度差が狭まって冷却効率が低下するため、同じ量の蒸気を冷却するためにより多くの水を必要とすることになる。さらに、気候変動に伴う水循環の変化によって利用可能な水資源量の変化も想定され、河川や湖沼の表流水に依存している大陸内部の火力発電所では冷却水量自体の減少も懸念される。

これまでも、発電所で利用可能な淡水資源の将来展望に関する研究は行われてきたが、想定している将来シナリオが極めて限定的であった。本論文は火力発電所における将来の冷却効率の変化に対する人為的な温暖化の寄与と将来の発電量を評価すると共に、大陸河川沿いに設置された火力発電所による熱汚染による水温の変化も明らかにした意欲的な研究である。

第 1 章では研究の背景と概要がとりまとめられる。その上で第 2 章では、実際の過去の気候シナリオ(HIW)、過去に温暖化がなかったと仮定した場合の歴史的な自然シナリオ(Hist-nat)、2 つの将来シナリオ(SSP126 と SSP585)を想定し、その流出量を河川動力学モデル CaMa-Flood を用いて河川流量に変換し、人為的な温暖化に起因するリスクの減少と増加の両方を対称的に判断するための指標(SymFAR)を新たに定義して、乾燥期間と湿潤期間の規模と継続時間の変化に分けて火力発電所で利用可能な表流水量の将来変化が解析された。

その結果、気候変動に起因するリスクの規模と継続時間の変化は、特に極端な現象において、非対称的に大きくなることが明らかとなった。継続時間については主に乾燥期間に、規模については湿潤期間に大きなシフトが観察された。また、世界のほとんどの地域において、乾燥期間よりも湿潤期間の方が規模は大きく期間が短くて、この傾向は温暖化が進むにつれて強まる傾向にあり、発電所はより長い乾燥期間に直面して冷却効率は低下し、発電量の変動も大きくなるため、収益が減少する懸念があることが明らかとなった。

第 3 章では、河川水温モデル HEAT-LINK に CMIP6 大気・地表面データを

入力して、過去および将来における人為的な温暖化の影響を考慮した場合と考慮しない場合の水温の将来変化が推計され、将来の水温上昇において人為的な温暖化の影響が増大しつつあることが確認された。特に夏季の温度上昇が顕著であり、冬季は水の凍結によって影響は軽減されるのに対し、気温や土壌温度は冬季に最も顕著な変化を示す見込みとなった。

また、すべての将来シナリオにおいて、季節を問わず気温が上昇する可能性が高いため、冷却水の需要は年間を通じて増加し、温暖で乾燥した期間も長くなるため、発電所の冷却効率が低下する期間も長くなると推計されている。

第4章では、熱力学モデル HEAT-LINK と CaMa-Flood とを組み合わせた発電所モデルが新たに開発され、気候変動が火力発電所の生産量に及ぼす影響や熱汚染の変化が推計される。

まず、利用可能なオープンソースの発電所データを組み合わせて世界の火力発電所の位置や規模に関する新たなデータセットが作成された。また、過去の研究における理論値から熱力学的効率を決め、水温と熱伝導方程式に基づいて水需要を計算し、環境流量や排出される温排水の水温上昇に対する追加許容値(AAWTR)の制約を考慮して推計した水の利用可能量と対応付けて実際の取水量、発電所の発電量が算定できるようになり、副次的に熱排水量も推計されている。また、この発電所モデルでは、貫流式冷却システムを備えた発電所(OT)と複合式冷却システムを備えた発電所(CB)とを区別しており、複合式冷却システムを備えた発電所が温暖な時期または水不足の時期にのみ冷却塔を稼働させるといった冷却塔の動的割り当て(DACT)が考慮されている。AAWTR や DACT という制約やメカニズムは以前の発電所モデルでは組み込まれていなかった。

この発電所モデルを用いて、2つの過去のシナリオと5つの将来のシナリオすべてに対して、OTとCBのどちらでも過去の期間に比べて電力生産量が全体的に減少すると推計された。ただし、温暖化が進むシナリオ(SSP370)では水需要が増加にも増して水利用可能量が増加するため、全体として温暖化があまり進まないシナリオ(SSP245)よりは発電量が多くなっている。

また、気温が高く水が足りない状況下での DACT が増加するため、水需要は OT では増加する一方 CB では減少し、乾燥高温の機会が増えるため特に OT では発電所の効率性も落ち、発電所による水温上昇は DACT によって CB の方が OT よりもはるかに小さくなると推計されている。

さらに、発電所の冷却効率は温暖化に伴って将来的に低下するが、OT システムの代わりに CB システムを導入すれば、発電所の強靱性を増大でき、また DACT を採用することで将来的に増加する熱汚染を減らせることが明らかとなっている。

このように、本論文は、冷却方式の違いを考慮可能な発電所での冷却水使用推

計モデルを新たに構築し、気候変動によって変化する利用可能な水資源量と水温の将来推計に基づき、河川水など表流水に冷却水源を依存している世界の火力発電所の将来の発電量や温排水による熱汚染を推計し、複合式冷却システムの導入による冷却塔の動的割り当てによって発電量の減少や変動の増大といった気候変動の悪影響を緩和できることを明らかにしたものである。化石燃料を利用した火力発電所は次第に減らされるとしてもバイオ燃料などを用いる火力発電所は将来にも存続すると考えられ、内陸部の火力発電所に不可欠な冷却水利用の将来推計と悪影響の軽減策を明らかにした本研究の意義は大きく、今後のグローバルなエネルギー・水循環研究の進展にも大きく寄与するものと期待される成果である。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。