日本の都市部におけるマイクロ水力発電の展開

1. はじめに

1.1 日本のエネルギーの現況

エネルギーの一形態である水力発電を考えるにあたり、まずはじめに、人類がエネルギーをどのように獲得してきたのかを簡単に概観する。古代においては、薪などを主として住まいの暖房や調理の熱源として利用していた。また、農耕などに牛馬を耕作用動力源として利用してきた。その後、ヨーロッパで産業革命がおこり、石炭をエネルギー源として使用するようになった。1849年に米国で最初の油田開発がなされ、エネルギー源として加わった。このように近年では、石炭、石油、および天然ガスなどの化石燃料が主なるエネルギー源として利用されている。

現在、我々はエネルギーを電力の形態[1)]で簡便に利用するようになった。図1[2)]には2010年度国内発電電力量の構成を示している。発電電力量の約60%を化石燃料に、また約30%を原子力発電に依っていた。しかし、この構成は2011年3月11日に起こった東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故後、大きく変わった。現在(2014年2月9日)は国内の原子力発電所は全て停止しており、発電電力量に対する化石燃料への依存割合が更に大きくなっている。国産の再生可能エネルギーは水力など10%に満たない。

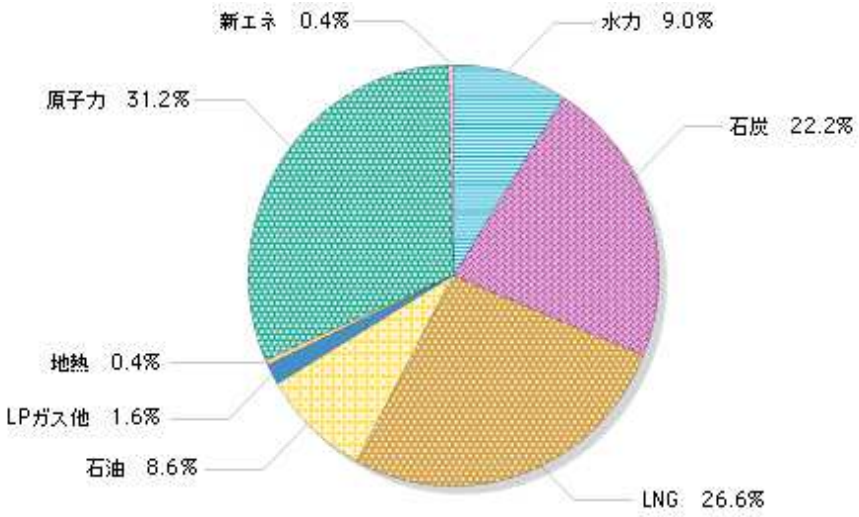


図1. 2010年度国内発電電力量の構成[2)]

現在、化石燃料はほとんど海外からの輸入に頼っている。図2[2)]には2000年代の各国の一次エネルギー自給率（原子力を除く）を示している。日本はわずか4%程度であり、残りの96%が輸入である。

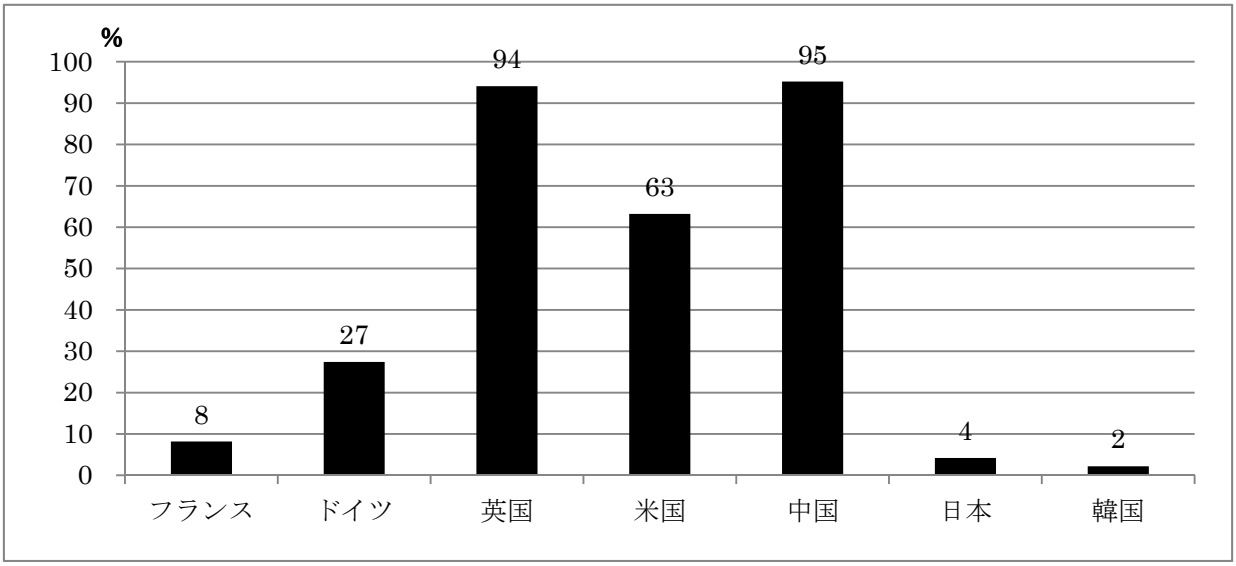


図2. 2000年代の各国の一次エネルギー自給率（原子力を除く）[2)]

このように日本のエネルギーのほとんどは海外に依存しており、エネルギーの安全保障の観点から考えると、この自給率の低さはかなり危ういものである。現在のエネルギーを化石燃料に依存する体制から、今後は国産エネルギーとしての再生可能エネルギーの一層の開発が重要である。

1.2　地球温暖化への影響

石炭火力などの電源ごとの発電電力量当たりの二酸化炭素（CO_2）排出量を図3[1)]に示した。ここでLNG火力は液化天然ガス火力、LNGコンバインドは最近の効率化した液化天然ガス火力のことである。石炭、石油、および天然ガス火力発電からの二酸化炭素排出量は、太陽光発電、風力発電、地熱発電、および水力発電などの再生可能エネルギーよりも桁違いに多いことがわかる。これら再生可能エネルギーを使用した発電からは、二酸化炭素の排出は無いはずであるが、これらの発電設備を建設する際に現存の火力発電からの電気を使用するため、その分が見積もられて図下部に示されている。2011年3月11日に起こった東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故後、現在では化石燃料に依存する火力発電量が増えたため、二酸化炭素排出量はかなり増加している。

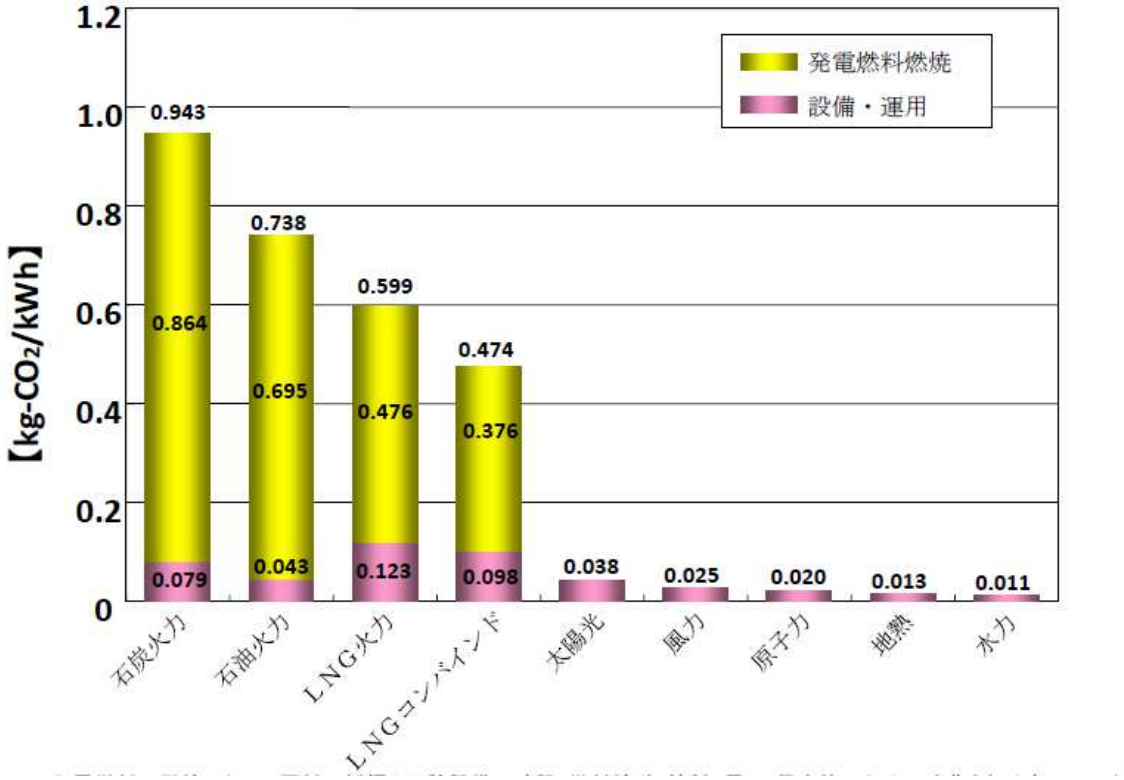


図3. 電源ごとの発電電力量当たりのＣＯ$_2$排出量[1)]

大気中の水蒸気、二酸化炭素、メタンなどの気体は温室効果ガスと称される。その理由は、太陽光が地表面にあたり地表を暖めて、熱線である赤外線が地球外に出ることを温室効果ガスが妨げることによる。地表から約10kmまでの大気層中の温室効果ガスは赤外線を吸収して温まり、大気層を温室のようにする。なぜ二酸化炭素が大きく問題にされるか。古来から水蒸気は自然界に一定割合で存在し、一方、二酸化炭素は人類の化石燃料の燃焼で年々、増加していることによる。また、メタンなどは二酸化炭素に比べて濃度がかなり低い。

図4[3)]には、化石燃料消費と大気中の二酸化炭素濃度の推移を示している。産業革命前、大気中の二酸化炭素濃度は280ppm程度であったが、その後、化石燃料消費の増大とともに増加している。それとともに気温が上昇することによって気候が変動し、海面上昇や砂漠化など地球に大きな影響を及ぼすことが懸念されるようになった。このような地球温暖化に対応するために、人類はエネルギーの消費量をできるだけ減らすと同時に、化石燃料から再生可能エネルギーなどへの転換が必要である。

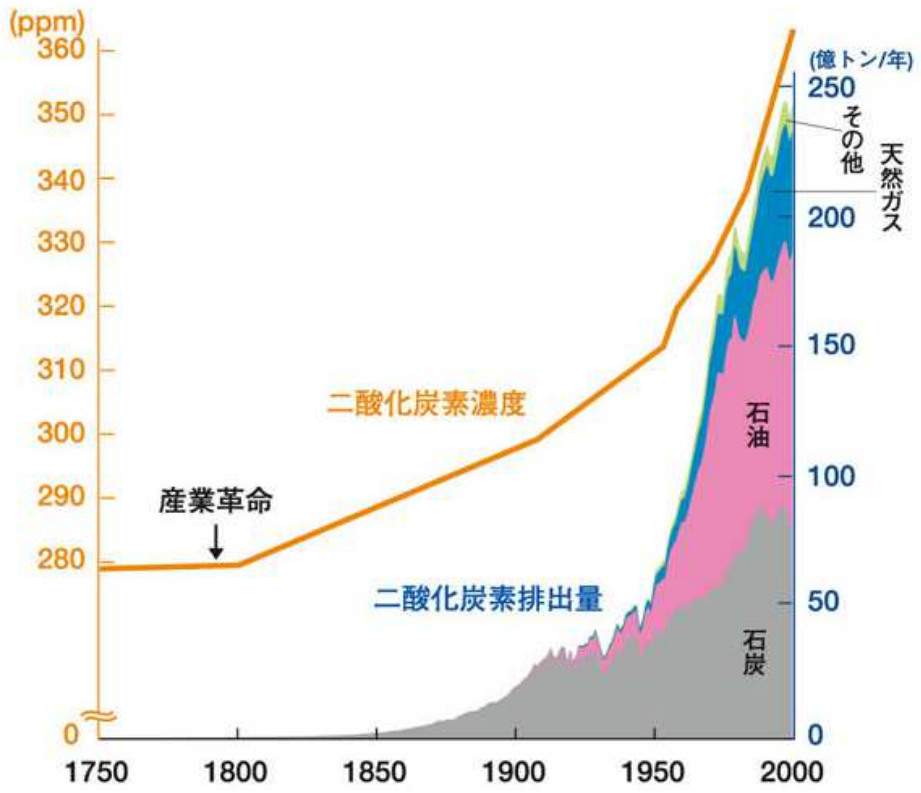


図4. 化石燃料消費と大気中の二酸化炭素濃度の推移[3)]

1.3　再生可能エネルギー固定価格買取制度

デンマークは1990年に「エネルギー計画2000」を発表し、2005年までに二酸化炭素排出量を20%削減し、2000年までに1300MWの風力発電を新規導入することを目指した。そして1999年には既に達成し、また国内電力量の20%を風力発電で得ている[4)]。更に1992年から再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入を開始した。また、ドイツは1998年に「再生可能エネルギー法」を成立させ、再生可能エネルギー固定価格買取制度を始めた[5)]。2011年3月11日に起こった東日本大震災による東京電力福島原子力発電所の事故後、メルケル政権は2022年までに9基ある原子力発電所の廃止を決定した。

日本においては、これらの国からかなり遅れて2012年7月に再生可能エネルギー固定価格買取制度の導入を始めた[6)]。この制度は、再生可能エネルギー（太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス）を用いて発電された電気を、表1に示した一定価格で電気事業者が買い取ることを義務付けた制度である。しかし、実際は賦課金として電気利用者である国民が負担している。また、この買取の一定価格は、毎年見直されることになっている。

表1. 再生可能エネルギー固定買取価格[6)]

平成26年度買取価格	
種別	買取価格/kWh
太陽光	34～37円
風力	23～59円
水力	15～36円
地熱	28～42円
バイオマス	14～40円

固定価格買取制度の導入後の2013年10月末までの再生可能エネルギー発電設備認定状況は、太陽光、風力、水力、地熱、およびバイオマスでそれぞれ2453, 84, 13, 0.5, 71 万kWであった[7)]。このように圧倒的に太陽光が多い。その理由としては、太陽光発電設備の取り付けが他の再生可能エネルギーに比べて容易であること、また製造会社や関連会社が非常に多いことが考えられる。

筆者は、先に滋賀県北西部の大津市役所木戸支所における太陽光発電の事例を報告した[8)]。そこに設置された太陽光発電設備が日本の他の地域と比較して発電量および稼働率で、どの程度であるかを検討した。その結果、最大発電量の定格発電(10kW)に対して、実際の発電量との比率である稼働率は、検討期間全体の平均稼働率として11.9%であった。この値は、環境省の日本平均の報告値12%[9)]とほぼ一致した。このように稼働率が低いのは、太陽光は当然ながら夜間には発電しない、また、雨や曇りの日は発電量が低いことによる。また、風力発電も稼働率は20%程度[10)]である。しかし、これらに比べて水力発電は維持管理等で停止している以外は稼働しており、その稼働率は90%以上である。

以下、本稿において水力発電に関して報告するが、固定買取価格での水力に関しては、発電が3万kW以下の中小水力発電に限定されている。これは、それ以上は大手の電力会社がダム式水力発電で発電し、既に電気利用者に売電しているためである。

2. 従来のマイクロ水力発電

前節において水力発電の稼働率が太陽光や風力に比べて非常に大きいことを記

した。日本は面積の約70%が山岳地域である。また森林も豊富である。森林は天然のダムと言われるほど、そこには多くの谷川が存在する。そしてほぼ一年中、水は流れている。筆者は固定価格買取制度の再生可能エネルギーのうち、水力発電が日本の風土にあったものであると考えている。

一般に水力発電は、発電出力の大きさによって表2[11]に示したように分類されている。本稿においては、いまだ充分に利用されていないマイクロ水力発電を中心に報告する。このマイクロ水力発電は大水力などのダムの建設が必要でなく、環境調和型の水力発電である。

表2　水力発電の分類[11]

区分	発電出力
大水力	100,000kW 以上
中水力	10,000kW　～　100,000kW
小水力	1,000kW　～　10,000kW
ミニ水力	100kW　～　1,000kW
マイクロ水力	100kW　以下

2.1　中山間部

水力発電のエネルギー源は、水の持つ落差のエネルギーと流量のエネルギーの積からなっている。中山間部は山からの谷川が平野部に比べて多い地域である。そのため平野部の川に比べて落差のエネルギーを有効に利用できる。

全国小水力利用推進協議会が出している小水力発電事例集[12]には様々な実施例が記載されている。東京都環境局は東京都の奥地の西多摩郡多摩町にある「東京都立奥多摩湖畔公園　山のふるさと村」に「山のふるさと村小水力発電設備」を2012年6月に設置している。写真1は、発電施設建屋である。建屋裏のサイグチ沢から25m落差で13L/s流量で最大出力0.95kWの電力を得ている。その発電は施設内の電気と、ビジターに自然エネルギーを教える教材として利用している。

写真1. 山のふるさと村小水力発電建屋[12)]

筆者らは、2005年から滋賀県西北部の比良山系の比良川においてマイクロ水力発電をおこなっている[13)]。この活動は地元の町おこしの相談から始められた。筆者が当地の自然風土にあった自然エネルギー利用と地球温暖化抑止対策の一環としてマイクロ水力発電を提案した。写真2には比良のマイクロ水力発電小屋を示した。45m落差の4L/s流量で最大出力0.2kWの電力を得ている。筆者らの経験からの課題としては、自然の川からの取水に際して、砂や落ち葉などの除塵対策をいかに有効におこなうかが挙げられる。

写真2. 比良のマイクロ水力発電小屋[13)]

以上の事例以外にも、現在中山間部でのマイクロ水力発電に関する多くの報告がある[12,14]。

2.2　農業用水路

国内の農業用水路は総延長約40万kmあり[15]、年間の包蔵水力118GWhのうち51%が未開発であり、その多くが小水力と報告されている[16]。これまでは、水路を流れる流水の持つエネルギーを電力に変えることを対象としていなかった。しかし、農業用水路はかなりの程度整備されており、前節で記した除塵対策は比較的容易で、また既存水路を利用するため土木工事費も抑えられる。

星野[17,18]らは那須野ケ原土地改良区において、精力的に種々の自然エネルギーの活用をおこなっている。水力発電以外にも図5に示したように、太陽光発電、燃料電池、バイオガスプラント等を開発している。

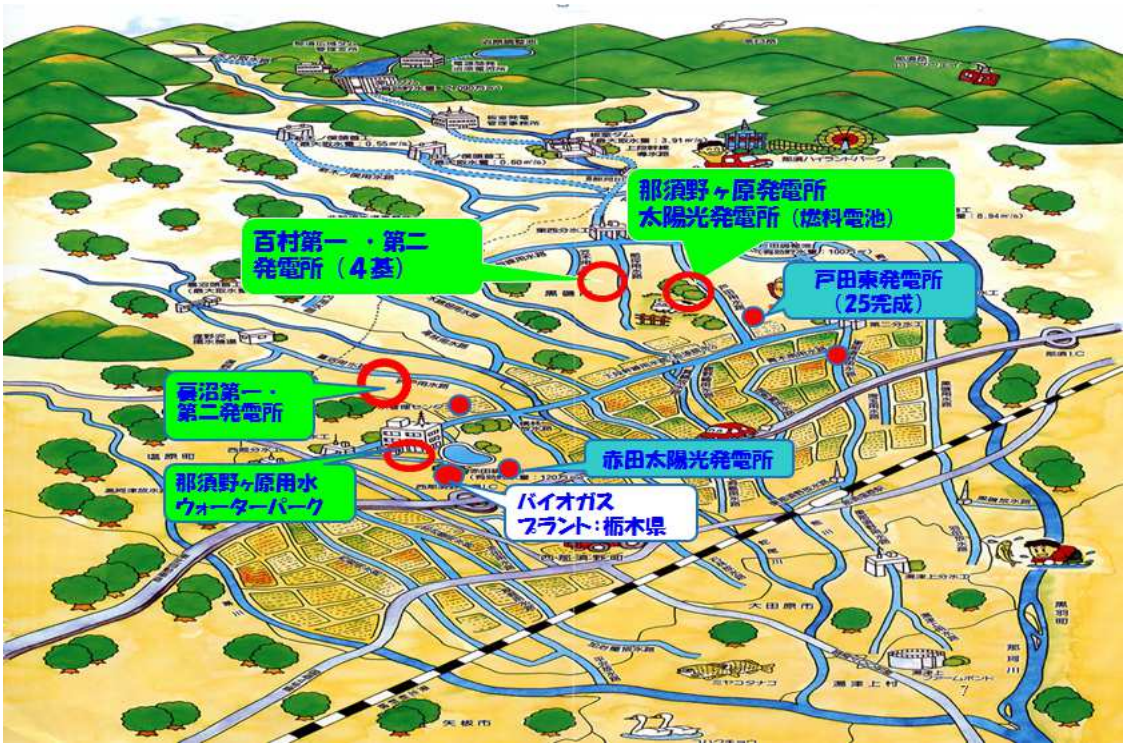


図5. 那須野ケ原土地改良区における自然エネルギー利用[18]

現在、那須野ケ原土地改良区には総延長340kmの農業水路があり、百村発電所(4基)、蟇沼発電所(2基)、那須野ケ原発電所の計7基が稼働している。合計1000kWの最大出力があり、二酸化炭素削減量は3070t/年で家庭600世帯分にあたる。さらに戸田東発電所が2014年3月15日に完成予定である。

今後、半農半エネルギーとして農業用水路をマイクロ水力発電の対象として考え

ることは農業者にとって有効であると考える。そして、新しい就農の場として大いに期待でき、農山村地域における雇用の拡大にも繋がると思える。

3. 都市部のマイクロ水力発電

前節までの従来型のマイクロ水力発電は、主に中山間地域の水資源が豊富な地域に存在していた。マイクロ水力発電のもつ特徴の一つとして、分散型電源であることが挙げられる。従来の火力発電や原子力発電は集中型の大型電源で、東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故のように災害時には、広域に影響を及ぼす。しかし分散型電源の場合は、被害を受けても他の分散型電源で補うことができ、災害に強いといえる。このような理由から、都市部においてもマイクロ水力発電を設置することは、災害に対して有効な手段の一つとして機能する。以下では都市部で展開されている種々のマイクロ水力発電について報告する。

3.1 都市河川利用

都市内に河川があり、澱みない流れがあればマイクロ水力発電を適用することができる。山梨県都留市は市政50周年の記念に2005年10月、市庁舎敷地内の家中川に「元気くん1号」を完成させた[11]。この建設費用の一部は、市民から募集したミニ市場公募債を活用し、官民協力によって導入している。その後、2010年1月には「元気くん2号」、そして2012年3月に「元気くん3号」を稼動させている。写真3[19]に示した1,2,3号の最大出力は、それぞれ20，19，7.3kWである。発電電力は市庁舎などの電力として使われ、余った電力は売電されている。この元気くんの取り組みは、地域の活性化にも繋がっている。

写真3.　都留市の元気くん1,2,3号[19]

富山市は市内に常願寺川と神通川など大小の河川が流れ、古くから川で結ばれた文化圏を形成している。市は、このような地域の特性を活かし、再生可能エネルギーの普及のために常西公園(写真4[20])と東町・東新町公民館にマイクロ水力発電所を2012年3月に設置した[12]。それぞれの発電最大出力は、9.9kW, 88kWである。年間の発電量は200世帯分に当たり、二酸化炭素削減量は400t/年である。発電電力は照明や防犯灯等に利用され、余剰電力は売電し、その収入を発電所の維持管理費等に充てている。

写真4. 常西公園内のマイクロ水力発電[20]

富山市はマイクロ水力以外にも太陽光、バイオマス等の新エネルギーをひとつのエネルギーパークに見立て、体験型の施設として、また小中学生を対象とした環境教育やエコツアーの場としている。

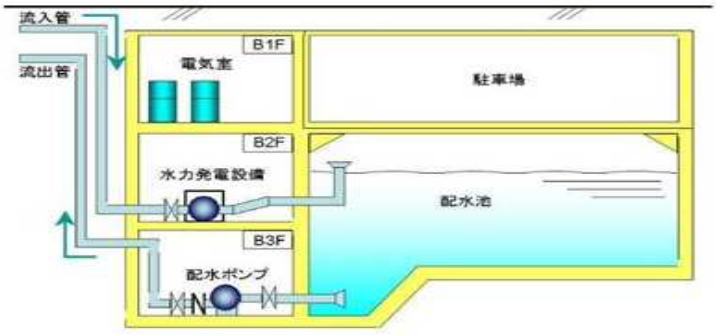
このように都市を流れる川を利用してマイクロ水力発電をおこない、地域の様々な施設の電気を創り、活性化に役立てている。

3.2 上水処理場利用

都市において川などの水源が無い所での取り組みとして、水道などの既にある水インフラの利用がある[21]。水力発電で一番費用がかかるのが土木工事の部分である。しかし、上水処理場や次節で紹介する下水処理場には既設の水路管があり、これら

を有効に利用すれば水力発電システムを安く、短期に導入できる。

大阪市水道局では、水道水を配水するための長居配水場に水力発電設備を2004年4月に設置している。図6に長居配水場の断面図と、その水力発電設備[22)]を示した。



長居配水場　断面イメージ図

長居配水場に設置した水力発電設備

図6. 大阪市水道局長居配水場[22)]

水道水が流入管を通して1.3m^3/sの流量で、落差26mで地下2階にある水力発電機に送られ、最大出力253kWで発電される。これは一年間で一般家庭約440世帯分が消費する電力量に相当し、二酸化炭素の排出量を約650 t/年削減することになる。大阪市水道局においては、2014年4月から泉尾配水場において同様の水力発電を開始する。予定では最大出力80kWの全量を固定価格買取制度で売電することになっている。

このような上水処理場や配水場での水力発電は、多くの水道局で既におこなわれている。ここでは紙面の都合上、具体的には示さないが東京都、千葉県、神奈川県や多くの地方自治体の水道局でなされている。

3.3　下水処理場利用

前節でも記したように下水処理場には既設の水路管があり、これらを有効に利用

すれば水力発電システムを安く、短期に導入できる。また上水処理場の場合も、本節での下水処理場の場合も処理水を利用するため、河川などで水力発電を設置する場合に比べてゴミ撤去等の除塵機を必要としない。

富山県下水道公社は小矢部川流域下水道二上浄化センター[23]でマイクロ水力発電を2013年2月から稼働させている。図7に示すように、0.85m^3/s処理水を小矢部川に落差2mで放流する際に発電している。

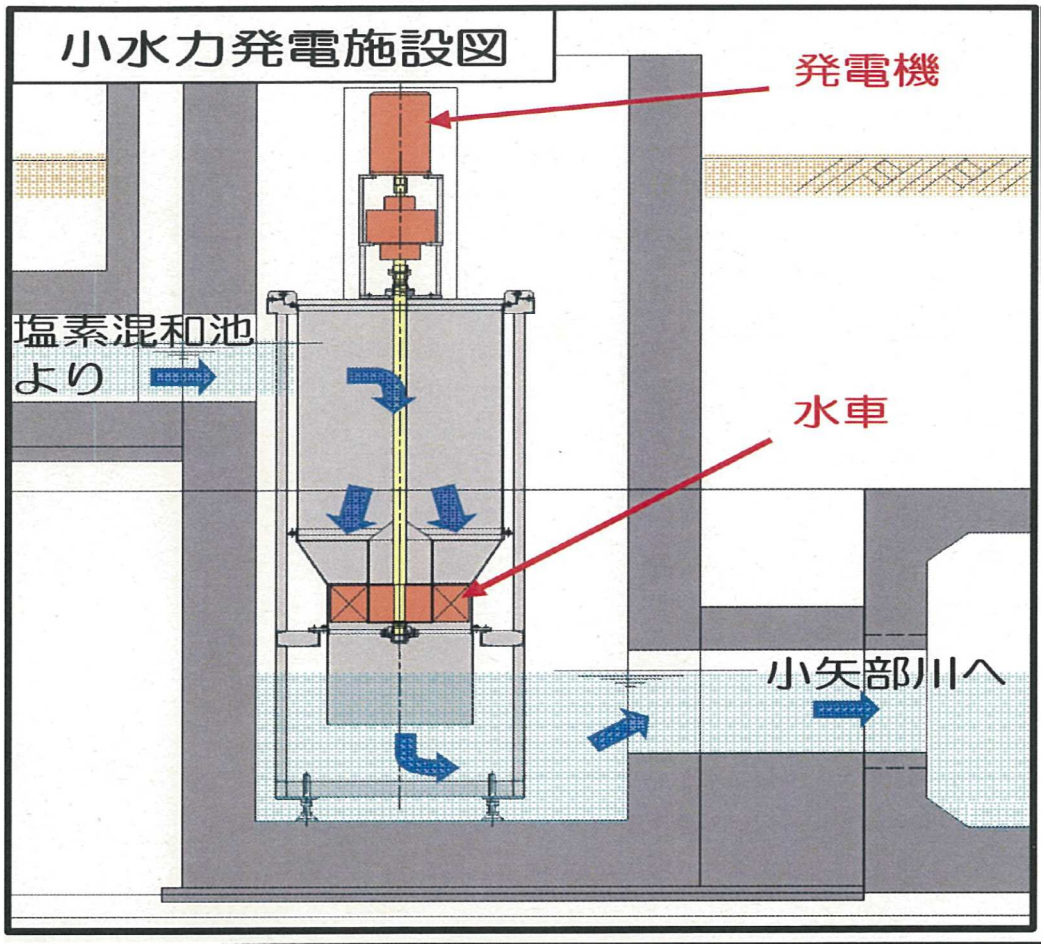


図7. 小矢部川流域下水道二上浄化センターのマイクロ水力発電[23]

このシステムでの最大出力は10kWで、一年間で一般家庭約21世帯分が消費する電力量に相当し、二酸化炭素の排出量を約33 t/年削減することになる。

前節の上水処理場や配水場での水力発電と同様に、多くの下水道施設で既におこなわれている。例えば東京都や多くの地方自治体でなされている。

3.4 ビルにおける展開

都市に林立するビルを眺めた時、ビル内を上下に流れ落ちる上水、下水、空調冷却水や雨水等は流量が少なくとも、落差が大きくマイクロ水力発電の対象として浮かび上がる。

NHKは、放送センター内にマイクロ水力発電システムを導入し、2008年5月から運転を開始している[24)]。図8にはシステムの概念図を示した。

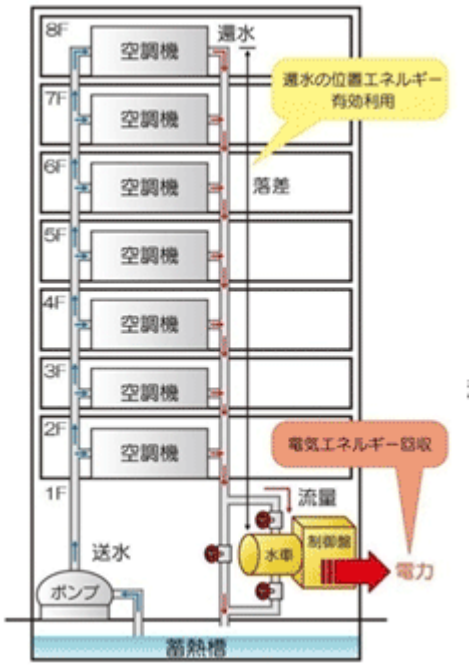


図8. NHK放送センターのマイクロ水力発電システム概念図[24)]

このシステムでは、ビル内の空調機冷却水の循環水を発電に利用している。年間の発電量は約8000kWhで、全て建物内設備に消費している。二酸化炭素の排出量を2年間で約47 t削減できたことになる。

同様なビル内の空調機冷却水の循環水を発電に利用している事例として、宮崎県都城市市役所がある[25)]。ここでは空調システム運転時に約2.2kWの発電出力を得ている。

筆者は都市に降る雨に着目し、ビルに降った雨水のマイクロ水力発電利用を2013年9月からおこなっている。対象としているビルは、関西外国語大学中宮学舎本館の高層棟である。11階テラスに雨水タンクを設置し、4階ベランダに発電器を設置して、検討をおこなっている。写真5は設置した発電器である。現在、データを取り続けており、今後発表予定である。

写真5. 関西外国語大学中宮学舎本館高層棟に設置したマイクロ水力発電器

このような雨水利用を対象としたマイクロ水力発電システムは、今後都市において検討すべき対象として考えられる。

4. おわりに

先にも記したように、従来の火力発電や原子力発電は集中型の大型電源であり、東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故のように災害時には、広域に影響を与える。しかし分散型電源の場合は、被害を受けても他の分散型電源で補うことができ、災害に強いといえる。このような理由から、都市部においてもマイクロ水力発電を設置することは、災害に対して有効な補完手段としても機能する。

以上に記してきた種々のマイクロ水力発電事例は、水力発電の中でも最も小さな電力であるが、全国的に普及が広がれば積算として大きな電力量として寄与できる。櫻庭は国内の包蔵水力を報告している[26)]。その中で未利用落差発電包蔵水力調査の結果、100kW未満のマイクロ水力発電が8割を占めると記している。また、今後、電気の自家消費施設建設による住民のエコ意識向上を目的とした社会インフラとしての水力発電の開発が重要であると、まとめている。

筆者は、都市部においても様々な既存の施設を利用したマイクロ水力発電が未だ開発されていないと考えている。エネルギーの自給率を高める必要性や、さらに

化石燃料の燃焼による二酸化炭素等による地球温暖化を抑止するためにも、マイクロ水力発電の更なる開発が必要である。

参考資料

1) 電力中央研究所編　「電力中央研究所報告書」2010年。

2) 経済産業省資源エネルギー庁編「エネルギー白書」2010年。

3) 環境省・地球温暖化観測推進事務局、
http://occco.nies.go.jp/ondanka/db_e.html(2014.2.14現在).

4)　小澤祥司「減電社会」講談社、2012年、35-43頁。

5)　同上、99-129頁。

6) 電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法
(平成二十三年八月三十日法律第百八号)

7) 資源エネルギー庁、2014年1月10日発表,
http://www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/dl/setsubi/201310setsubi.pdf(2014.2.14現在).

8) 青木豊明　「滋賀県北西部の大津市役所木戸支所における太陽光発電の事例報告」『自然と環境』,Vol.15, 2013, 44-49頁。

9) 環境省編　「中核的温暖化対策技術検討会中間報告書」2003年。

10)　新エネルギー・産業技術総合開発機構編「NEDO再生可能エネルギー技術白書」2013年。

11)SAFE誌編集部「小水力発電が低炭素エネルギー社会の未来を拓く」『SAFE』, Vol.81, 2010, 5-9頁。

12)全国小水力利用推進協議会編　「小水力発電事例集2011」2012年。

13) 青木豊明、刈谷拓爾　「滋賀県西北部比良川におけるマイクロ水力発電の試み」『自然と環境』,Vol.10, 2008, 4-9頁。

14)水の文化編集部「小水力の底力」『水の文化』No.39, 2011年。

15) 井上素行、白石栄一　「再生可能エネルギーとしての新たな時代の水力」『科学技術動向』,No.108, 2010, pp.21-35.

16) 北洞貴也、小出良平、稲垣守人、大池真悟　「農業用水路の落差工に適した貫流水車に関する研究」『ターボ機械』Vol.39,No.3,2011,pp.41-48.

17) 星野恵美子　「米と電気は自分で創りたい」『週刊農林』No.2124,2011, pp.14-15.

18) 那須野ヶ原土地改良区連合,

http://www.nasu-lid.or.jp/(2014.2.14現在).
19) 都留市役所,
http://www.city.tsuru.yamanashi.jp/forms/info/info.aspx?info_id=2681 (2014.2.14 現在).
20) 富山市役所、
http://www.city.toyama.toyama.jp/kankyobu/kankyoseisakuka/ondankataisakukikaku/toyamasi-jisedai_3.html#syousui(2014.2.14現在).
21) 東京発電 「小水力発電の現状と将来展望」『電気と保安』,
9・10月号, 2013, pp.4-7.
22) 大阪市水道局、
http://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000020881.html
(2014.2.14現在).
23) 小矢部川流域下水道二上浄化センター、
http://www.pref.toyama.jp/cms_pfile/00011670/00632758.pdf
(2014.2.14現在).
24) NHK放送センター、
http://www.nhk.or.jp/pr/marukaji/m-giju217.html (2014.7.1現在).
25) 須田隆二 「ビルの中の小水力発電」『資源環境対策』
Vol.43,No.5,2007,pp.46-48.
26) 櫻庭孝一 「我が国の包蔵水力の現状」『ターボ機械』Vol.39,No.3,2011,
pp.7-10.