低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

中小水力発電

―要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ（着手段階）―

Small/medium-scale Hydroelectric Generations:
Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap based on Elemental Technology Structure (First Step)

Strategy for Technology Development

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action toward Low Carbon Societies

独立行政法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

LCS-FY2013-PP-06

概要

我が国における中小水力発電は大きな再生可能エネルギー源であるが、現状では建設費としての初期コストが高く、普及の妨げになっている。日本の中小水力発電の未開発賦存量は約 1,000 万 kW とされており、ひとつひとつは小規模であるが、全国に約 2 万地点分散している。一例として 100 ～ 300kW 程度の規模が見込める候補地点について試算したところ、現状の発電原価は補助金等がない場合、35 円 /kWh 以上であり、市況のエネルギー単価に近づけるためには建設費を 1/3 程度にコストダウンする必要のあることが分かった。

コストダウンの可能性を検討するため、電気関係工事費の大半を占める水車と発電機の原材料費率の逆数をシステム付加価値と定義し、使用する材料に付加する加工費の割合を調査、計算した。水車および発電機合計のシステム付加価値は 1,000kW 以下の範囲では発電規模によらず 20 程度であり、原材料費に比べ加工費偏重のコスト構造であることが分かった。現状では水車、発電機とも地点特有の流量や落差に合わせた個別の設計、製造を行っており、かつ年間の生産量が 20 台程度と低く、標準化や量産化が進みにくいためと思われる。

水力発電技術はほぼ成熟しており、新技術等による大幅なコストダウンは難しいが、量産によるコストダウンの可能性を検討した。その結果、全国約 2 万地点に分散する候補地点に標準化された複数台の水車および発電機を使うことで、現在の 100 倍以上の需要が見込め、水車および発電機のコストを 1/3 程度にできる可能性のあることが分かった。

今後、発電原価を決める他の要因である土木工事費、各河川の流況の影響、年間経費率などについても調査し、各河川の流況に適した賦存量、発電原価の算出法を確立し、全国への普及促進方法を提案する。

目次

概要
１．緒言…… 1
２．水力発電の発電原価と影響要因…… 1
３．水力発電建設費の主な内訳…… 2
４．現状の発電原価の試算…… 2
５．水車および発電機のコスト、重量、原材料費率の分析…… 3
６．水車および発電機のコストダウンの可能性について…… 4
７．政策立案のための提案…… 6

1．緒言

水力発電は他の再生可能エネルギーに比べて供給安定性に優れ、設備利用率も高い利点がある反面、初期投資が大きいため、普及を難しくしている。その発電設備容量は既設が約 2,000 万 kW（揚水発電を除く）、未開発が約 1,000 万 kW とされている。比較的投資効率の良い大規模なダム建設を伴う発電地点はほぼ開発済みであり、今後の開発可能な地点は、主に河川を利用した中小規模の流れ込み式発電所である。これらは、地点数は多いものの、小規模であり、個別の投資効率は悪く、広く普及させるためには大幅なコストダウン策が必要である。

また、中小水力発電候補地は、発電能力が水量と落差といった個別の制約があり、地域への依存度が高いが、全国に広く分布しており、普及が進めば他の再生可能エネルギーとも併用した分散型エネルギー源としても有望である。

本稿は、中小水力発電の普及促進のあり方について、賦存量の適切な把握の意義や、建設費のコストダウンの可能性を中心に提案するものである。

なお、新技術の導入を含む詳細な要素技術の構造化、および水利権など法規制への対応については今後進める。

2．水力発電の発電原価と影響要因

水力発電の発電原価を決める要因は主に以下のようなものがある。

・初期投資としての建設費
・河川の年間の流況、落差、水車および発電機の性能によって決まる年間の発電電力量
・設備の維持管理費や金利などによって決まる年間経費率

普及に必要なコストダウンの可能性を検討するためには、これらのコスト構造を明らかにして、それぞれについて対策を検討する必要がある。

建設費については、電気関係工事費と土木工事費からなり、それぞれの内容項目はさらに細分化されている。低炭素社会戦略センターでは建設費のおよその分類とそれらの費用の構成比率を調査、検討した。その結果、電気関係工事費については水車と発電機の費用が大半を占めることがわかり、さらに原材料費率などを明らかにし、コストダウンの可能性を示した。土木工事費については地形の影響を大きく受けるため、今後の検討課題とする。

発電電力量については、基本的には発電規模を決める流量と落差によって決まるが、流量は年間を通じ変動しており、年間の発電電力量は河川や降水量によって大きく変わる。一年を通じた河川流量の特徴を流況といい、流況は発電原価を決めるうえで大きな要因になる。

流況と発電原価の関係について個別には調査されているが、系統的なデータ例は少ないため今後調査する。

年間経費率については、発電原価に及ぼす影響は大きいが、発電規模や発電所の管理形態によって様々であるため、今後検討する。

現状のおよその発電原価を把握するため、一例として比較的小さい 100kW ～ 300kW 程度の規模が見込める候補地点について発電原価を試算したところ、35 円 /kWh 以上（補助金等なし）であった。市況のエネルギー単価に近づけるためには現状の 1/3 程度にコストダウンを行う必要があることが分かった。

水車と発電機についてコスト分析を行った結果、適切な量産により現状の 1/3 程度にコストダウンできる可能性のあることが分かった。以下に詳細を述べる。

3．水力発電建設費の主な内訳

表 1 に現在の中小水力発電の建設費の主な内訳を示す。建設費は電気工事費と土木工事費に大別され、電気工事費はさらに水車、発電機、制御盤などに分類されるが、水車と発電機の費用が大半を占めることが分かる。土木工事費は取水口形状、水路形状、水圧管形状など多数に分類されるが地形の影響を大きく受けるため、地点により土木工事費は大きく変わる。

表 1　中小水力発電建設費の主な内訳

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">建設費大分類</th><th rowspan="2">コスト比率
（現状）</th><th colspan="2">パラメータ（発電量・コスト）</th></tr>
<tr><th>大分類</th><th>中分類</th></tr>
<tr><td rowspan="10">電気工事費</td><td rowspan="3">水車</td><td rowspan="3">50 ～ 60%</td><td rowspan="3">水車タイプ</td><td>落差</td></tr>
<tr><td>流量と効率</td></tr>
<tr><td>回転数</td></tr>
<tr><td rowspan="3">発電機</td><td rowspan="3">10 ～ 20%</td><td rowspan="3">発電機タイプ</td><td>回転数</td></tr>
<tr><td>極数</td></tr>
<tr><td>電圧</td></tr>
<tr><td rowspan="3">制御盤</td><td rowspan="3">30%</td><td rowspan="3">制御盤タイプ</td><td>周波数</td></tr>
<tr><td>電圧</td></tr>
<tr><td>系統連携有無</td></tr>
<tr><td>小計</td><td>100%</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">土木工事費</td><td colspan="2" rowspan="4">電気工事費の 0.5 ～ 5 倍</td><td colspan="2">取水口形状</td></tr>
<tr><td colspan="2">水路形状</td></tr>
<tr><td colspan="2">水圧管形状</td></tr>
<tr><td colspan="2">堰堤有無</td></tr>
</table>

4．現状の発電原価の試算

対象となる河川の年間の流量変化の特徴を表す流況により、同じ発電設備容量であっても河川が異なれば年間の発電電力量や設備利用率に差が生じ、建設費は同じでも、発電原価は違ってくる。同じ河川であれば、その水車が使用できる最大の流量（m^3/s）（最大使用水量：発電規模）が多いほど発電量は増加するが、機器の大型化を伴うことから水車等設備費も増加し、発電原価へ影響する。その影響は河川の流況により様々である。図 1 に、例として木曽川水系候補地点Ａの最大使用水量と年間発電電力量および発電原価について計算した結果を示す。この例では、発電規模は 100 ～ 300kW 程度、発電原価は 35 ～ 60 円 /kWh 程度であり、普及のためには現状の 1/3 程度になるようなコストダウンが必要である。

今後、各地の河川の流況の発電原価への影響について調査し、さらに、コストダウンにより水車、発電機の種類、台数等の適切な組み合わせを可能にすることで発電効率を上げる検討を行う。それらにより、各河川の流況に適した賦存量、発電原価の算出法を確立し、全国への普及促進方法を提案する。

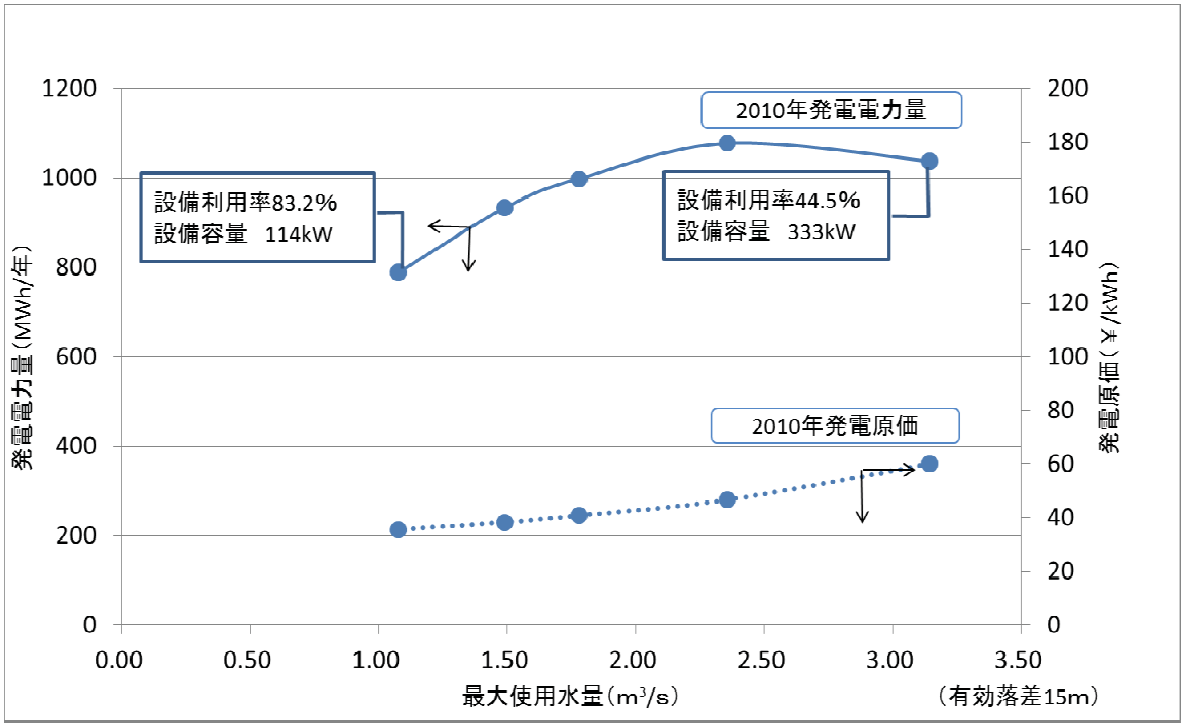

図１　木曽川水系候補地点 A の最大使用水量と年間発電電力量および発電原価の関係
電気関係工事費は「水力発電計画工事積算の手引き」（平成 24 年度　資源エネルギー庁）を参照。土木工事費は電気関係工事費の３倍､経費率８％。水車 / 発電機の総合効率は 0.72 とした。発電電力量の算出は｢中小水力発電ガイドブック（新訂５版)」（(財）新エネルギー財団）を参照。

５．水車および発電機のコスト、重量、原材料費率の分析

電気関係工事費の大半を占める水車と発電機のコストダウンの可能性を検討するため、発電規模と原材料費率の関係を調べた。水車、発電機は流量や落差により多数の種類がありコストや重量もさまざまであるが、およその関係を把握するため以下の仮定において調査した。

発電出力 P（kW）は（１）式のように流量 Q（m^3/s）と有効落差 He（m）によって決まるため、同じ発電出力 P でも Q と He の組み合わせにより重量もコストも変わる。

$$P=9.8 \times Q \times He \times \eta \qquad (1)$$

η：水車、発電機の総合効率（0.72）

以下では、He を一定（30 m）として、Q を変化させて発電出力 P を決めている。水車と発電機は一般的に使用されるフランシス水車と同期発電機とした。表２に水車および発電機の最大出力別原材料費率とシステム付加価値を示す。

原材料費率は規模（最大出力）に関わらず水車は５～６％程度、発電機は４～５％程度である。原材料費率の逆数をシステム付加価値(コスト / 材料原価)と定義すると水車は 17 ～ 19 程度前後、発電機は 20 ～ 28 程度である。

現状では注文生産であり生産数量も少ない水車や発電機も量産ができればシステム付加価値が下がり、コストダウンができる可能性がある。

表２　水車および発電機の最大出力別原材料費率とシステム付加価値

出力緒元	最大出力（kW）	10	50	100	200	500	750	1000
	最大使用水量（m^3/s）	0.05	0.24	0.47	0.94	2.36	3.54	4.72
水車	水車重量（ton）	2.4	5.3	7.8	11.7	21.0	27.5	33.5
	水車コスト（M¥）	9.8	24.0	35.2	51.8	86.1	107.8	126.5
	水車原材料費（鉄：ステン＝5：5)(M¥)	0.6	1.3	1.9	2.8	5.0	6.6	8.0
	水車原材料費率（鉄：ステン＝5：5)(%)	5.9	5.3	5.3	5.4	5.9	6.1	6.4
発電機	同期発電機重量（ton）	0.3	0.9	1.5	2.4	5.7	8.8	11.9
	同期発電機コスト（M¥）	2.4	8.1	13.9	23.6	47.7	65.2	81.3
	同期発電機原材料費（鉄：銅＝6：4)(M¥)	0.1	0.3	0.5	0.8	2.0	3.1	4.1
	同期発電機原材料費率（鉄：銅＝6：4)(%)	4.3	3.9	3.7	3.6	4.2	4.7	5.1
グラム単価	水車グラム単価（¥/g）	4.1	4.5	4.5	4.4	4.1	3.9	3.8
	同期発電機グラム単価（¥/g）	8.2	9.0	9.4	9.7	8.4	7.4	6.8
	水車＋発電機グラム単価（¥/g）	4.5	5.2	5.3	5.3	5.0	4.8	4.6
水車＋発電機	水車＋発電機　重量（ton）	2.7	6.2	9.3	14.2	26.7	36.3	45.5
	水車＋発電機　コスト（M¥）	12.2	32.1	49.1	75.4	133.8	173.0	207.8
	水車＋発電機　原材料費（M¥）	0.7	1.6	2.4	3.7	7.0	9.7	12.2
	水車＋発電機　原材料費率（%）	5.6	5.0	4.9	4.9	5.2	5.6	5.9
システム付加価値	水車　システム付加価値	16.9	18.8	18.8	18.4	17.1	16.3	15.7
	発電機　システム付加価値	23.5	25.8	26.9	28.0	24.1	21.4	19.6
	水車＋発電機　システム付加価値	17.9	20.2	20.6	20.6	19.1	17.9	17.0

原材料価格　鉄鋼：80k¥/ton　ステンレス：400k¥/ton　伸銅品：750k¥/tonとした。
コスト計算式：「水力発電計画工事費積算の手引き」（平成24年度　資源エネルギー庁)。
重量計算式：「中小水力発電ガイドブック」（(財) 新エネルギー財団　新訂5版)。
有効落差30 m、水車/発電機総合効率0.72各一律とした。

６．水車および発電機のコストダウンの可能性について

水力発電は自然の地形を利用するため発電地点の流量と有効落差がさまざまである。現状では、その地点に適した性能の水車および発電機を個別に設計製造しているため[1)]、現需要数が少ないこともあり（年間20台ほどの新設[2)]）、水車および発電機のコストは原材料費率に比べて加工費率が高く、高価である。

また、水車、発電機とも技術的にはほぼ完成されており大幅な効率向上等は期待できない状況であるため、コストダウンには標準化と量産化が有効と思われる。

図２は表２のデータを基に、水車、発電機および水車＋発電機について発電出力とシステム付加価値の関係を示したものである。水車＋発電機のシステム付加価値は発電規模を示す発電出力によらず、ほぼ20程度である。これは、発電規模によらず生産方式が個別の特注生産になっているためと思われる。

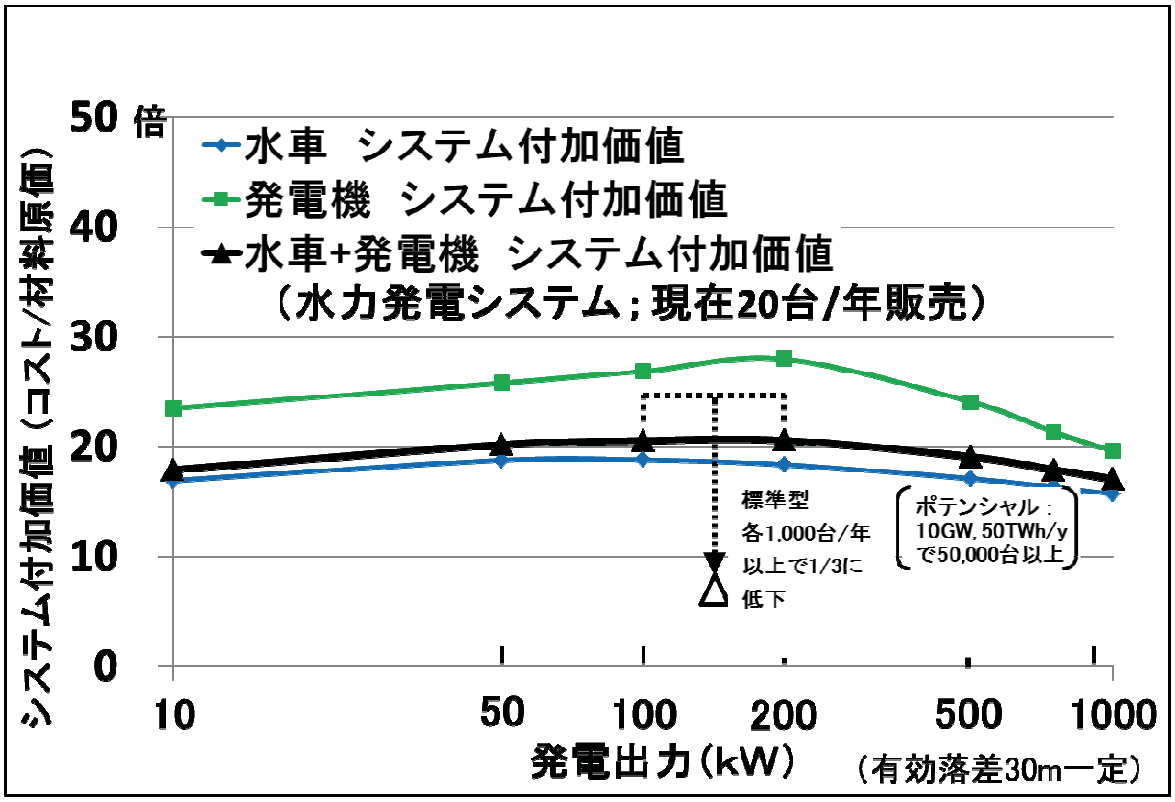

図２　水力発電のシステム付加価値と発電出力の関係

表３は環境省調査による未開発中小水力発電の賦存量と地点数を出力区分別にまとめたものである。地点数は全国で約２万箇所あり、その約 90% は 1,000kW 以下の出力規模である。たとえば、量産化のために水車、発電機とも標準化した 100kW と 200kW の２機種に絞り、各地点複数台の組み合わせで構成すれば、未開発賦存量約 1,000 万 kW 建設のために５万台以上の水車及び発電機の需要が生まれることになる。標準化により、個別設計したものよりも個々の効率は落ちるが、流量変化の大きい河川の場合は標準化した小規模の水車 / 発電機を複数台使うことで、全体の水車効率を高めることが可能である。例えばフランシス水車の場合、流量が 1/5 程度に変化すると水車効率は 40% 程度低下するが、複数台に分割して流量変化の小さい範囲で各水車を運転することにより、この効率低下を 10% 程度に抑えることができる[3)]。このように標準化はコストダウンのみならず、全体の効率を高める効果もあるため有効な手段である。各機種 1,000 台 / 年（合計 2,000 台 / 年）を建設していくと約 25 年で普及を終え、その後 25 年周期でリプレースを繰り返すことで年間の需要は継続していくことになる。これは、現在約 20 台 / 年から約 2,000 台 / 年の 100 倍の生産量になり、量産効果によるコストダウンの可能性を示している。

表４は量産品の事例として、一般用発電機（６極）のコスト、重量、原材料費率、システム付加価値などについてまとめたものである。一般用発電機のシステム付加価値は仕様等の差もあると思われるが、５～８であり水車用と比べ概ね 1/3 程度になっている。量産によっても原材料費はほぼ同等と考えられるので、コストも現在の 1/3 程度に減じる可能性があり、普及の促進が期待できる。水車についても発電機と類似構造の回転機械であり同等の量産効果が期待できる。

未開発分 1,000 万 kW が普及すれば、設備利用率を 60% として、年間約 50TWh の電力量の増分となり、現在の国内年間全発電電力量（約 1,000TWh）の５% 相当分を未開発中小水力発電で賄えるようになる。

表３　未開発中小水力発電の賦存量と地点数（環境省）

出力区分(kW)	出力(GW)	地点数	1,000kW以下出力構成(%)	1,000kW以下地点数構成(%)
100未満	0.29	4,614	54	90
100 ～ 200	0.65	4,431		
200 ～ 500	1.79	5,604		
500 ～ 1,000	2.13	3,059		
1,000以下小計	4.86	17,708		
			1,000kW以上出力構成比(%)	1,000kW以上地点数構成比(%)
1,000 ～ 5,000	3.35	1,878	46	10
5,000 ～ 10,000	0.53	83		
10,000 ～ 30,000	0.25	17		
1,000 ～ 30,000小計	4.13	1,978		
合計	8.99	19,686	100	100

環境省「平成23年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」河川部導入ポテンシャルより抜粋

表４　一般用および水車用発電機のシステム付加価値の比較

発電機出力（kW）		100	200	500	750	1000
一般用	コスト（M¥）	1.20	2.24	5.10	7.35	9.52
	重量（t）	0.77	1.22	2.24	2.92	3.53
	グラム単価（¥/g）	1.55	1.83	2.28	2.52	2.69
	原材料費（M¥）	0.27	0.43	0.78	1.02	1.23
	原材料費率（%）	22.4	19.0	15.3	13.8	12.9
	システム付加価値（一般用発電機）	4.46	5.26	6.56	7.23	7.74
水車用	システム付加価値（水車用発電機）	26.9	28.0	24.1	21.4	19.6
システム付加価値比（一般用／水車用）		0.17	0.19	0.27	0.34	0.40

一般用発電機コスト／重量データ：MARATHON ELECTRIC社 （USA） カタログ（GPN 043 6533J-11/09-SK-PDF）より回帰式作成。為替レート100円／＄とした。
http://www.marathonelectric.com/generators/literature.jsp（2014年3月7日時点閲覧可）
水車用システム付加価値は表２を転記。その他計算は表２と同条件。

７．政策立案のための提案

（１） 日本の中小水力発電の未開発賦存量は約1,000万kWとされている。大きな再生可能エネルギー源であるが、現状では建設費としての初期コストが高く、普及の妨げになっている。現状のコストを分析し、市況のエネルギー単価に近づけるための課題と対策などを検討した。

（２） 一例として100 ～ 300kW程度の規模が見込める候補地点について試算したところ、現状の発電原価は補助金等がない場合、35円/kWh以上であり、市況のエネルギー単価に近づけるためには建設費を1/3程度にコストダウンする必要のあることが分かった。

（３） 現状は地点に合わせた個別設計、生産のため、原材料費よりも加工費偏重のコスト構造になっている。未開発地点は全国に約２万箇所ある。１地点に標準化した小規模の水車および発電機を複数台使用すれば５万台以上の需要が生じ、量産によるコストダウン（現状の1/3程度）が可能であることが分かった。

（4） 未開発分 1,000 万 kW が普及すれば、年間約 50TWh の電力量の増分となり、現在の国内年間総発電電力量の約 5％を中小水力発電で賄えるようになることが分かった。

さらに、定量的な量産コストダウン効果の把握、土木工事費のコストダウンの検討、全国の流況と発電原価の関係調査、年間経費率の調査などを行い、今後各河川の流況に適した賦存量、発電原価の算出法を確立し、全国への普及促進方法の提案書を作成する。

参考文献

１）全国小水力利用推進協議会編：小水力エネルギー読本
２）（財）新エネルギー財団：平成 21 年度低炭素社会に向けた水力発電のあり方に関する報告書
３）（財）新エネルギー財団：中小水力発電ガイドブック（新訂５版）

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

技術開発編

中小水力発電

ー要素技術の構造化に基づく定量的技術シナリオと科学・技術ロードマップ（着手段階）ー

Small/medium-scale Hydroelectric Generations:
Quantitative Technology Scenarios, and Science and Technology Roadmap based on Elemental Technology Structure (First Step)

Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2014.3

独立行政法人科学技術振興機構　低炭素社会戦略センター

平成 26 年 3 月

本提案書に関するお問い合わせ先

●提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 主任研究員　浅田 龍造（Ryuzo ASADA）
●低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター　企画運営室

〒102-8666　東京都千代田区四番町5-3　サイエンスプラザ 4 階
TEL : 03-6272-9270　FAX : 03-6272-9273　E-mail : lcs@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/lcs/

© 2014　JST/LCS
許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。