

付属資料-B

太陽光発電および風力発電

カンボジア国
再生可能エネルギー利用地方電化マスタープラン調査

ファイナルレポート
第5巻 付属資料

目次

付属資料-B 太陽光発電および風力発電

1. SOLAR POWER.....	AB-1
2. WIND POWER.....	AB-5
3. 衛星日射量資料のキャリブレーション.....	AB-6
1. Sihanouk Ville および Kampong Cham province での地上日射量.....	AB-6
2. Sihanouk Ville (SHV)および Kampong Cham の衛星データ	AB-7
3. 衛星データと地上観測データの比較.....	AB-7
4. まとめ.....	AB-10

付表目次

Table AP-B.1.1	Satellite Data on Annual Average Solar Irradiation.....	AB-1
Table AP-B.1.2	Satellite Data on No Sun or Black Days.....	AB-1
Table AP-B.1.3	Details of PV System Sizing for Solar BCS	AB-2
Table AP-B.1.4	Cost Estimation of PV System for Solar BCS	AB-2
Table AP-B.1.5	PV System Designing for Typical Public Facilities (1/3) [Health Post]	AB-3
Table AP-B.1.6	PV System Designing for Typical Public Facilities (2/3) [Night School]	AB-3
Table AP-B.1.7	PV System Designing for Typical Public Facilities (3/3) [Community Hall].....	AB-4
Table AP-B.1.8	Cost Estimation of PV System for Typical Public Facilities	AB-4
Table AP-B.2.1	Satellite Data on Annual Average Wind Speed at 50m above Ground Level	AB-5
Table AP-B.2.2	Satellite Data on Annual Average Wind Speed at 20m above Ground Level	AB-5
表 1	WTSC (Sihanouk Ville province)の日射量記録.....	AB-6
表 2	Kampong Cham の日射量記録.....	AB-6
表 3	SHV および Kg. Cham の月平均日射量と変動範囲	AB-7
表 4	SHV の地上観測記録および衛星データ.....	AB-8
表 5	Kg. Cham の地上観測記録および衛星データ	AB-9

付図目次

図 1	SHV の傾斜面衛星日射量および地上観測記録.....	AB-8
図 2	Kg. Cham の傾斜面衛星日射量および地上観測記録.....	AB-9

Appendix-B Solar & Wind Power

1. SOLAR POWER

Table AP-B.1.1 Satellite Data on Annual Average Solar Irradiation

Region	Boundary (In degree)		Elevation (m)	Monthly Averaged Isolation Incident on Horizontal Surface (kWh/m ² /day)											
	Latitude	Longitude		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	10 S - 11 N	103 W - 104 E	29	5.35	5.98	6.21	5.96	5.09	4.28	4.34	3.84	4.26	4.54	5.12	5.35
2	10 S - 11 N	104 W - 105 E	65	5.27	5.69	5.86	5.79	5.01	4.36	4.47	3.89	4.25	4.36	4.86	5.08
3	11 S - 12 N	103 W - 104 E	288	5.26	5.58	5.72	5.56	4.95	3.95	3.99	3.44	3.93	4.30	4.86	5.13
4	11 S - 12 N	104 W - 105 E	106	5.24	5.59	5.74	5.76	5.29	4.57	4.70	4.18	4.54	4.45	4.78	5.01
5	11 S - 12 N	105 W - 106 E	6	5.19	5.70	5.89	5.95	5.54	5.14	5.20	5.09	5.08	4.79	4.92	4.98
6	11 S - 12 N	106 W - 107 E	56	5.30	5.72	5.99	5.96	5.55	5.09	5.17	4.92	4.87	4.70	4.97	5.03
7	12 S - 13 N	102 W - 103 E	212	5.25	5.54	5.73	5.64	4.78	4.30	4.38	4.13	4.32	4.45	4.97	5.19
8	12 S - 13 N	103 W - 104 E	181	5.17	5.64	5.67	5.60	5.24	4.70	4.73	4.37	4.51	4.33	4.49	4.80
9	12 S - 13 N	104 W - 105 E	73	5.35	5.87	6.04	6.09	5.63	5.16	5.21	4.90	4.93	4.66	4.86	4.99
10	12 S - 13 N	105 W - 106 E	47	5.39	5.87	6.03	6.01	5.62	5.18	5.25	4.90	4.76	4.70	4.96	5.11
11	12 S - 13 N	106 W - 107 E	91	5.44	5.91	6.11	5.99	5.57	5.09	5.08	4.63	4.75	4.71	5.01	5.16
12	12 S - 13 N	107 W - 108 E	488	5.37	5.96	6.16	5.92	5.45	4.87	4.84	4.51	4.65	4.55	4.76	4.94
13	13 S - 14 N	102 W - 103 E	92	5.16	5.60	5.71	5.76	5.20	4.80	4.73	4.55	4.66	4.54	4.83	4.95
14	13 S - 14 N	103 W - 104 E	24	5.28	5.79	5.90	5.98	5.59	5.09	5.17	4.87	4.88	4.66	4.87	4.96
15	13 S - 14 N	104 W - 105 E	70	5.34	5.82	5.95	5.99	5.67	5.16	5.24	4.84	4.69	4.62	4.94	5.03
16	13 S - 14 N	105 W - 106 E	71	5.46	5.90	6.05	6.04	5.58	5.07	5.12	4.59	4.66	4.72	5.04	5.19
17	13 S - 14 N	106 W - 107 E	107	5.51	5.99	6.16	6.01	5.51	4.91	4.95	4.50	4.69	4.72	4.98	5.17
18	13 S - 14 N	107 W - 108 E	221	5.44	6.04	6.26	6.04	5.51	4.73	4.73	4.24	4.63	4.69	4.84	5.01
19	14 S - 15 N	103 W - 104 E	131	5.25	5.76	6.02	6.12	5.71	5.18	5.19	4.90	4.91	4.61	4.86	4.99
20	14 S - 15 N	104 W - 105 E	126	5.30	5.76	5.95	6.02	5.69	5.12	5.20	4.79	4.78	4.62	4.90	5.00
21	14 S - 15 N	106 W - 107 E	304	5.41	5.81	5.92	5.84	5.29	4.59	4.59	4.09	4.51	4.71	4.92	5.07
22	14 S - 15 N	107 W - 108 E	660	5.38	5.91	6.05	5.88	5.21	4.33	4.34	3.84	4.42	4.59	4.73	4.99
Average				5.32	5.79	5.96	5.90	5.39	4.80	4.84	4.45	4.62	4.59	4.88	5.05
Minimum				5.16	5.54	5.67	5.56	4.78	3.95	3.99	3.44	3.93	4.30	4.49	4.80
Maximum				5.51	6.04	6.26	6.12	5.71	5.18	5.25	5.09	5.08	4.79	5.12	5.35

Data Source : [http:// eosweb.larc.nasa.gov](http://eosweb.larc.nasa.gov)

Table AP-B.1.2 Satellite Data on No Sun or Black Days

Region	Boundary (In degree)		Elevation (m)	Equivalent Number of NO-SUN Or BLACK Days (days)												Annual Average (day)	
	Latitude	Longitude		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
1	10 S - 11 N	103 W - 104 E	29	2.25	1.35	1.49	1.99	2.51	3.46	5.95	6.77	5.73	9.34	2.38	4.45	1.85	3.96
2	10 S - 11 N	104 W - 105 E	65	1.88	2.11	2.16	1.76	3.27	6.05	6.31	6.93	6.14	2.41	4.07	2.31	3.78	
3	11 S - 12 N	103 W - 104 E	288	2.76	2.25	2.87	2.64	4.88	3.64	7.38	7.20	8.32	3.59	3.08	1.93	4.21	
4	11 S - 12 N	104 W - 105 E	106	2.42	1.25	3.32	2.60	4.10	6.69	5.40	6.37	3.70	3.55	4.07	2.09	3.79	
5	11 S - 12 N	105 W - 106 E	6	1.31	1.12	1.47	1.31	2.18	5.01	4.29	3.89	2.42	2.32	2.56	1.43	2.44	
6	11 S - 12 N	106 W - 107 E	56	1.52	1.02	1.91	1.61	1.67	2.23	4.13	3.15	3.44	3.29	2.53	1.35	2.32	
7	12 S - 13 N	102 W - 103 E	212	3.48	1.31	3.08	2.81	1.94	2.36	4.30	5.16	7.08	4.11	3.07	1.97	3.38	
8	12 S - 13 N	103 W - 104 E	181	2.75	1.43	2.51	2.62	2.83	3.51	5.11	4.61	4.12	2.86	4.74	1.86	3.24	
9	12 S - 13 N	104 W - 105 E	73	1.50	1.47	1.33	1.72	1.87	3.60	3.98	3.98	3.16	2.46	2.96	1.18	2.43	
10	12 S - 13 N	105 W - 106 E	47	1.61	0.76	2.05	1.19	1.59	3.35	4.13	3.03	2.14	3.10	3.20	1.33	2.29	
11	12 S - 13 N	106 W - 107 E	91	1.48	1.46	1.62	1.70	1.78	2.00	5.43	4.40	2.52	4.14	3.64	0.84	2.58	
12	12 S - 13 N	107 W - 108 E	488	1.50	1.31	2.01	1.46	1.99	3.57	4.79	4.39	1.54	4.14	3.15	1.56	2.61	
13	13 S - 14 N	102 W - 103 E	92	2.16	1.95	1.52	2.55	1.60	3.67	4.58	4.82	3.02	1.98	3.78	1.75	2.78	
14	13 S - 14 N	103 W - 104 E	24	1.87	1.40	1.99	2.25	2.71	4.82	4.43	3.24	3.68	1.79	4.18	1.62	2.83	
15	13 S - 14 N	104 W - 105 E	70	2.08	1.01	1.97	1.65	1.42	5.23	3.31	2.94	2.68	2.28	3.40	1.60	2.46	
16	13 S - 14 N	105 W - 106 E	71	1.76	1.47	2.10	0.94	1.27	2.54	3.39	4.38	3.47	4.13	4.16	1.43	2.58	
17	13 S - 14 N	106 W - 107 E	107	1.46	1.21	1.61	0.94	1.29	2.26	2.56	4.27	3.39	4.40	4.15	0.95	2.37	
18	13 S - 14 N	107 W - 108 E	221	0.91	1.01	1.68	0.94	2.36	3.17	4.32	5.84	4.65	5.35	4.15	1.29	2.97	
19	14 S - 15 N	103 W - 104 E	131	1.59	1.36	2.00	2.40	1.90	3.18	3.04	3.98	3.48	2.42	2.77	1.86	2.49	
20	14 S - 15 N	104 W - 105 E	126	1.28	1.40	2.44	2.84	1.68	3.39	3.39	2.97	3.07	2.28	2.87	1.61	2.43	
21	14 S - 15 N	106 W - 107 E	304	1.14	1.83	1.72	2.36	2.05	2.87	4.11	4.46	3.32	4.73	3.10	1.58	2.77	
22	14 S - 15 N	107 W - 108 E	660	0.74	1.37	2.25	3.06	3.03	2.42	5.71	7.10	3.52	5.45	3.17	1.49	3.27	
Average				1.79	1.40	2.05	1.99	2.31	3.70	4.58	4.67	4.00	3.32	3.51	1.58	2.90	

Data Source : [http:// eosweb.larc.nasa.gov](http://eosweb.larc.nasa.gov)

Table AP-B.1.3 Details of PV System Sizing for Solar BCS

Size of PV system for BCS	For 100 Ah Battery		For 70 Ah Battery		For 50 Ah Battery	
	Min. Insolation	Avg. Insolation	Min. Insolation	Avg. Insolation	Min. Insolation	Avg. Insolation
Parameter	Value	Unit	Value	Unit	Value	Unit
1 Total DC Current is (50% DOD)	50.0	Ah/day	35.0	Ah/day	25.0	Ah/day
2 Solar Irradiation	4.6	h/day	4.6	h/day	4.6	h/day
3 Module derating factor	10	%	10	%	10	%
4 Charge Controller (C/C) consumption	10	mA/h	10	mA/h	10	mA/h
5 Total Charging hour In a day	8	h/day	8	h/day	8	h/day
6 Total Consumption by Charge controller	0.08	Ah/day	0.08	Ah/day	0.08	Ah/day
7 System voltage is	12	V DC	12	V DC	12	V DC
8 Columbic efficiency (Charging eff. of Battery)	90	%	90	%	90	%
9 Required voltage for charging*	16.0	V	16.0	V	16.0	V
10 Required DC current to charge each battery	61.8	Ah/day	43.3	Ah/day	30.9	Ah/day

= Input Value

Even at higher ambient temperature system need to charge battery efficiently, for this output of C/C need to be at around 13.5 to 14Volts. Therefore, here total loss of the system is considered to be 2.0 Volts.

Total nos. of households to be covered	0 to 25 HH	26 to 50 HH	51 to 75 HH	76 to 100 HH
100Ah Capacity battery 20% of total household	5.0 nos.	10.0 nos.	15.0 nos.	20.0 nos.
70Ah Capacity battery 50% of total household	12.5 nos.	25.0 nos.	37.5 nos.	50.0 nos.
50Ah Capacity battery 30% of total household	7.5 nos.	15.0 nos.	22.5 nos.	30.0 nos.

Charging interval is in every	5 day
Size of each module is (Example)	50 Wp
Each module produce (Ipm) current	3.00 Amp

Total System Capacity

	Household nos. 0 to 25		Household nos. from 26 to 50		Household nos. from 51 to 75		Household nos. from 76 to 100	
	At 4.6 h/day	At 5.1 h/day	At 4.6 h/day	At 5.1 h/day	At 4.6 h/day	At 5.1 h/day	At 4.6 h/day	At 5.1 h/day
Required total DC current for charging	217	Ah/day	433	Ah/day	650	Ah/day	866	Ah/day
Required power to charge	3.5	kW/day	6.9	kW/day	10.4	kW/day	13.9	kW/day
Total current generation by each module	12.1	Ah/day	12.1	Ah/day	12.1	Ah/day	12.1	Ah/day
Number of modules in parallel	19.9	no.	39.8	no.	59.7	no.	79.6	no.
Total Number of module in parallel (Rounded)	20.0	no.	40.0	no.	60.0	no.	80.0	no.
Number of module in series (12V nominal)	1.0	no.	1.0	no.	1.0	no.	1.0	no.
Current produced by system	52.6	Ah	105.1	Ah	157.7	Ah	210.2	Ah
Total Current produce by the system	241.8	Ah/day	483.6	Ah/day	725.4	Ah/day	1050.6	Ah/day
Total PV Capacity	1.00	kWp	2.00	kWp	3.00	kWp	4.00	kWp
Total power generation by the system	4.1	kWp/day	8.3	kWp/day	12.4	kWp/day	16.6	kWp/day

Required Capacity of PV	at 4.6	at 5.1 kWh/m ² /day
for 0 to 25 households	1.0	0.9 kWp
for 26 to 50 households	2.0	1.8 kWp
for 51 to 75 households	3.0	2.7 kWp
for 76 to 100 households	4.0	3.6 kWp

Roundup Capacity of PV System	at 4.6	at 5.1 kWh/m ² /day
for 0 to 25 households	1.0	1.0 kWp
for 26 to 50 households	2.0	2.0 kWp
for 51 to 75 households	3.0	3.0 kWp
for 76 to 100 households	4.0	4.0 kWp

Value from this table is used to calculate system cost

From the detail calculation it is clear that if total capacity is rounded up to a digit than even thought solar irradiation varies (in this case) the out put is same.

Source: JICA Study Team

Table AP-B.1.4 Cost Estimation of PV System for Solar BCS

Required no. of Charge Controller	Min	Avg	Unit
for 0 to 25 households	5.0	5.0	nos.
for 26 to 50 households	10.0	10.0	nos.
for 51 to 75 households	15.0	15.0	nos.
for 76 to 100 households	20.0	20.0	nos.

Present International Market price	Unit	Cost
Photovoltaic (PV) module		3.7 US\$/Wp
Charge Controller (C/C) with Amp Hour Meter		265.0 US\$/pcs.

Item	Cost of System (US\$)								
	for 0 to 25 HH		for 26 to 50 HH		for 51 to 75 HH		for 76 to 100 HH		
	at 4.6	at 5.1	at 4.6	at 5.1	at 4.6	at 5.1	at 4.6	at 5.1	
Photovoltaic (PV) module	(a)	3,700	3,700	7,400	7,400	11,100	11,100	14,800	14,800
Charge controller (C/C)	(b)	1,325	1,325	2,650	2,650	3,975	3,975	5,300	5,300
Accessories cost 15% {(a+b) * 15%} (Structure, Breaker, Wires etc.)		754	754	1,508	1,508	2,261	2,261	3,015	3,015
Charging Station (Shade/House) cost		500	500	900	900	1,300	1,300	1,700	1,700
Total Cost		6,279	6,279	12,458	12,458	18,636	18,636	24,815	24,815

Note: (1) System is calculated on the base of country annual average (5.1kwh/m²/day) and minimum average (4.6kwh/m²/day) solar Irradiation
 (2) From the calculation it is clear that even thought system is designed for different irradiation if out put is rounded up it does not differ
 (3) Capacity of PV System is calculated on the base of 3.0 Imp, 50Wp module for reference.
 (4) Required Capacity is rounded up to minimize the differences between seasonal average solar Irradiation
 (5) PV system need to generate enough voltage to charge battery even at higher Ambient Temp (35 deg Celsius) and C/C must supply 13.5V and above.

Source: JICA Study Team

Table AP-B.1.5 PV System Designing for Typical Public Facilities (1/3) [Health Post]

DC Loads of Health post	Value	Unit	Quantity	Total Load (Watts)	Using (hours)	Total Load (kWh/day)
Lights (FL) 20 Watt	24.0	Watts	4	96.00	3.0	0.29
Lights (FL) 40Watt	48.0	Watts	4	192	3.0	0.58
Total load				288		0.86
Array Sizing parameter						
Incline Solar Irradiation (Avg)	5.1	kWh/m ² /day				
Module derating factor	10	%	Normally 10%			
If size of each module is	50.0	Wp				
If each module produce (Ipm) current	3.00	Amp				
Load						
Total power consumption at DC side	0.86	kWh/day				
Peak load	0.29	kWh				
Columbic efficiency	90	%	Normally 90%			
Charge controller Consumption	20	mA/h				
Total Consumption by Charge controller	0.5	Ah/day				
If System voltage is	12	V DC				
Hour In a day	24	h				
Battery Sizing parameter					= Input Values	
Battery Depth of Discharge (DOD)	80	%				
Days of Autonomy	3	days				
Rate Factor	1.3					
Therefore.					Rate Factor =	
Total DC Load is	1.00	kWh/day			Ah (Calculated hour rate)	
Total DC Load Current is	83.3	Ah/day			Ah (Standard hour rate of manufacturer)	
Average rate of Discharge	90	hours rate			3 days x 24 hours/day	
Total current generation by each module	13.8	Ah/day			Avg. Rate of Discharge =	
Number of modules in parallel	6.7	no.			0.8 max. discharge	
Number of module in parallel (Rounded up)	7	no.				
Number of module in series (12V nominal)	1.0	no.				
Total number of module	7.0	no.				
Total required PV Capacity for the system	350.0	Wp				
Total power generation by the system	1.6	kWp/day				
Total Current produce by the system	96.4	Ah/day				
Size of Charge controller (Rounded up)	19.0	Amp				
Required Battery capacity (Calculated hours rate)	313	Ah				
Required Battery capacity (at 10 hours rate)	240	Ah				
(Source: JICA Study Team)				Note: First chose the size of battery in Calculated hours rate . If not available bring the battery at manufactures standard rate. For this if you don't know any value then average Rate factor is 1.3 (safety value)		

Table AP-B.1.6 PV System Designing for Typical Public Facilities (2/3) [Night School]

DC Loads of Night school	Value	Unit	Quantity	Total Load (Watts)	Using (hours)	Total Load (kWh/day)
Lights (FL) 20 Watt	24.0	Watts	4	96.00	3.0	0.29
Lights (FL) 40Watt	48.0	Watts	10	480	3.0	1.44
Total load				576		1.73
Array Sizing parameter						
Incline Solar Irradiation (Avg)	5.1	kWh/m ² /day				
Module derating factor	10	%	Normally 10%			
If size of each module is	50.0	Wp				
If each module produce (Ipm) current	3.00	Amp				
Load						
Total power consumption at DC side	1.73	kWh/day				
Peak load	0.58	kWh				
Columbic efficiency	90	%	Normally 90%			
Charge controller Consumption	20	mA/h				
Total Consumption by Charge controller	0.5	Ah/day				
If System voltage is	12	V DC				
Hour In a day	24	h				
Battery Sizing parameter					= Input Values	
Battery Depth of Discharge (DOD)	80	%				
Days of Autonomy	3	days				
Rate Factor	1.3					
Therefore.					Rate Factor =	
Total DC Load is	1.96	kWh/day			Ah (Calculated hour rate)	
Total DC Load Current is	163.3	Ah/day			Ah (Standard hour rate of manufacturer)	
Average rate of Discharge	90	hours rate			3 days x 24 hours/day	
Total current generation by each module	13.8	Ah/day			Avg. Rate of Discharge =	
Number of modules in parallel	13.2	no.			0.8 max. discharge	
Number of module in parallel (Rounded up)	14	no.				
Number of module in series (12V nominal)	1.0	no.				
Total number of module	14.0	no.				
Total required PV Capacity for the system	700.0	Wp				
Total power generation by the system	3.2	kWp/day				
Total Current produce by the system	192.8	Ah/day				
Size of Charge controller (Rounded up)	38.0	Amp				
Required Battery capacity (Calculated hours rate)	613	Ah				
Required Battery capacity (at 10 hours rate)	471	Ah				
(Source: JICA Study Team)				Note: First chose the size of battery in Calculated hours rate . If not available bring the battery at manufactures standard rate. For this if you don't know any value then average Rate factor is 1.3 (safety value)		

Table AP-B.1.7 PV System Designing for Typical Public Facilities (3/3) [Community Hall]

DC Loads of Community hall	Value	Unit	Quantity	Total Load (Watts)	Using (hours)	Total Load (kWh/day)
Lights (FL) 20 Watt	24.0	Watts	2	48.00	2.0	0.10
Lights (FL) 40Watt	48.0	Watts	4	192	2.0	0.38
Total load				240		0.48
Array Sizing parameter						
Incline Solar Irradiation (Avg)	5.1	kWh/m ² /day				= Input Values
Module derating factor	10	%	Normally 10%			
If size of each module is	50.0	Wp				
If each module produce (Ipm) current	3.00	Amp				
Load						
Total power consumption at DC side	0.48	kWh/day				
Peak load	0.24	kWh				
Columbic efficiency	90	%	Normally 90%			
Charge controller Consumption	20	mA/h				
Total Consumption by Charge controller	0.5	Ah/day				
If System voltage is	12	V DC				
Hour In a day	24	h				
Battery Sizing parameter						
Battery Depth of Discharge (DOD)	80	%				
Days of Autonomy	3	days				
Rate Factor	1.3					
Therefore.						
Total DC Load is	0.57	kWh/day				
Total DC Load Current is	47.8	Ah/day				
Average rate of Discharge	90	hours rate				
Total current generation by each module	13.8	Ah/day				
Number of modules in parallel	3.9	no.				
Number of module in parallel (Rounded up)	4	no.				
Number of module in series (12V nominal)	1.0	no.				
Total number of module	4.0	no.				
Total required PV Capacity for the system	200.0	Wp				
Total power generation by the system	0.9	kWp/day				
Total Current produce by the system	55.1	Ah/day				
Size of Charge controller (Rounded up)	11.0	Amp				
Required Battery capacity (Calculated hours rate)	179	Ah				
Required Battery capacity (at 10 hours rate)	138	Ah				
Note: First chose the size of battery in Calculated hours rate . If not available bring the battery at manufactures standard rate. For this if you don't know any value then average Rate factor is 1.3 (safety value)						

Table AP-B.1.8 Cost Estimation of PV System for Typical Public Facilities

Cost of component		
Item	Cost	Unit
Photovoltaic (PV) Module	3.7	US\$/Wp
Charge Controller (12Ah)	95	US\$/pcs
Charge Controller (20Ah)	115	US\$/pcs
Charge Controller (40Ah)	220	US\$/pcs
Battery (Deep cycle)	1.47	US\$/Ah
Light (FL) 20W	15	US\$/set
Light (FL) 40W	30	US\$/set

Note: (1) Prices are on large volume purchase.
 (2) Charge controller (C/C) is adjusted to the available size

Cost of System									
Item	Photovoltaic PV (a)		Charge controller (b)		Battery (d)		Light (e)	Accessories Cost (a+b+d+e)*20% (f)	Total (before Taxes)
	Wp	US\$	Ah	US\$/pcs	Ah	US\$			
Health Post	350	1,295	20	115	240	354	180	389	2,333
Night School	700	2,590	40	220	471	695	360	773	4,638
Community Hall	200	740	12	95	138	203	150	238	1,426

Note: Accessories includes Switch, Wires, Structure etc.
 (Source: JICA Study Team)

2. WIND POWER

Table AP-B.2.1 Satellite Data on Annual Average Wind Speed at 50m above Ground Level

Reigon	Boundary (In degree)		Elevation (m)	Monthly Averaged Wind Speed at 50m above Surface of the Earth (m/s)												Annual Average (m/s)
	Latitude	Longitude		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	10 S - 11 N	103 W - 104 E	29	3.55	3.60	3.66	3.11	3.00	4.09	4.00	4.38	3.36	3.14	4.32	4.46	3.72
2	10 S - 11 N	104 W - 105 E	65	2.78	2.82	2.97	2.61	2.43	2.88	2.88	2.99	2.24	2.37	3.28	3.41	2.80
3	11 S - 12 N	103 W - 104 E	288	3.31	3.20	3.19	2.77	2.60	3.50	3.44	3.65	2.72	2.80	3.88	4.13	3.26
4	11 S - 12 N	104 W - 105 E	106	2.67	2.64	2.78	2.48	2.29	2.71	2.73	2.78	2.02	2.29	3.23	3.30	2.66
5	11 S - 12 N	105 W - 106 E	6	3.29	3.08	3.08	2.59	2.31	2.87	2.92	3.01	2.12	2.44	3.57	3.73	2.91
6	11 S - 12 N	106 W - 107 E	56	5.19	4.51	4.09	3.08	2.66	3.98	3.99	4.32	3.03	3.24	4.88	5.40	4.03
7	12 S - 13 N	102 W - 103 E	212	3.88	3.52	3.34	2.91	2.62	3.70	3.57	3.77	2.78	2.98	4.09	4.61	3.48
8	12 S - 13 N	103 W - 104 E	181	3.50	3.24	3.14	2.76	2.48	3.25	3.18	3.31	2.41	2.71	3.77	4.12	3.15
9	12 S - 13 N	104 W - 105 E	73	3.12	2.96	2.95	2.62	2.34	2.81	2.79	2.85	2.04	2.44	3.46	3.62	2.83
10	12 S - 13 N	105 W - 106 E	47	3.60	3.33	3.21	2.71	2.37	2.99	2.98	3.09	2.16	2.16	3.80	3.96	3.03
11	12 S - 13 N	106 W - 107 E	91	4.95	4.36	3.93	3.04	2.58	3.77	3.75	4.03	2.76	3.24	4.80	5.15	3.86
12	12 S - 13 N	107 W - 108 E	488	6.31	5.39	4.63	3.36	2.78	4.55	4.53	4.97	3.36	3.86	5.81	6.33	4.65
13	13 S - 14 N	102 W - 103 E	92	4.07	3.68	3.56	3.16	2.74	3.53	3.38	3.53	2.56	2.95	4.04	4.51	3.47
14	13 S - 14 N	103 W - 104 E	24	4.09	3.73	3.53	3.09	2.65	3.35	3.21	3.36	2.44	2.88	3.99	4.43	3.39
15	13 S - 14 N	104 W - 105 E	70	4.13	3.78	3.50	3.02	2.54	3.18	3.04	3.19	2.31	2.81	3.95	4.34	3.31
16	13 S - 14 N	105 W - 106 E	71	4.51	4.09	3.70	3.07	2.56	3.34	3.21	3.42	2.44	3.03	4.30	4.67	3.52
17	13 S - 14 N	106 W - 107 E	107	5.28	4.69	4.13	3.24	2.67	3.84	3.73	4.05	2.82	3.53	5.09	5.39	4.03
18	13 S - 14 N	107 W - 108 E	221	6.03	5.28	4.58	3.42	2.78	4.33	4.25	4.69	3.19	4.03	5.86	6.11	4.54
19	14 S - 15 N	103 W - 104 E	131	3.69	3.38	3.25	2.89	2.48	3.03	2.92	3.01	2.15	2.59	3.58	3.90	3.07
20	14 S - 15 N	104 W - 105 E	126	3.98	3.65	3.39	2.96	2.50	3.06	2.93	3.05	2.21	2.70	3.79	4.13	3.19
21	14 S - 15 N	106 W - 107 E	304	5.17	4.65	4.15	3.33	2.69	3.78	3.64	3.91	2.81	3.70	5.14	5.33	4.02
22	14 S - 15 N	107 W - 108 E	660	5.86	5.22	4.61	3.56	2.81	4.25	4.11	4.47	3.19	4.33	5.97	6.06	4.53
Average				4.22	3.85	3.60	2.99	2.58	3.49	3.41	3.62	2.59	3.01	4.30	4.59	3.52

Data Source : [http:// eosweb.larc.nasa.gov](http://eosweb.larc.nasa.gov)

Table AP-B.2.2 Satellite Data on Annual Average Wind Speed at 20m above Ground Level

Reigon	Boundary (In degree)		Elevation (m)	Adjusted Monthly Averaged Wind Speed for 20 meters height & Vegetation type (m/s)												Annual Average (m/s)
	Latitude	Longitude		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
1	10 S - 11 N	103 W - 104 E	29	2.74	2.73	2.96	2.25	2.17	2.97	2.90	3.18	2.43	2.32	3.25	3.41	2.77
2	10 S - 11 N	104 W - 105 E	65	2.15	2.14	2.40	1.89	1.76	2.08	2.08	2.16	1.62	1.75	2.46	2.61	2.09
6	11 S - 12 N	103 W - 104 E	288	2.56	2.43	2.58	2.01	1.88	2.53	2.49	2.64	1.97	2.06	2.92	3.16	2.43
7	11 S - 12 N	104 W - 105 E	106	2.06	2.00	2.25	1.79	1.66	1.96	1.98	2.01	1.46	1.69	2.43	2.52	1.98
8	11 S - 12 N	105 W - 106 E	6	2.54	2.33	2.49	1.87	1.68	2.08	2.11	2.18	1.53	1.80	2.68	2.85	2.17
9	11 S - 12 N	106 W - 107 E	56	4.01	3.43	3.31	2.23	1.93	2.88	2.89	3.13	2.19	2.39	3.68	4.13	3.01
10	12 S - 13 N	102 W - 103 E	212	3.00	2.67	2.70	2.11	1.90	2.68	2.59	2.73	2.01	2.20	3.07	3.53	2.59
11	12 S - 13 N	103 W - 104 E	181	2.70	2.46	2.54	2.00	1.79	2.35	2.30	2.40	1.74	2.00	2.83	3.15	2.35
12	12 S - 13 N	104 W - 105 E	73	2.41	2.24	2.38	1.90	1.69	2.03	2.02	2.06	1.48	1.80	2.60	2.77	2.11
13	12 S - 13 N	105 W - 106 E	47	2.78	2.52	2.60	1.96	1.71	2.16	2.16	2.24	1.56	1.92	2.86	3.03	2.29
14	12 S - 13 N	106 W - 107 E	91	3.82	3.31	3.18	2.20	1.87	2.73	2.72	2.92	2.00	2.39	3.61	3.94	2.89
15	12 S - 13 N	107 W - 108 E	488	4.88	4.09	3.75	2.43	2.01	3.30	3.28	3.60	2.43	2.85	4.37	4.85	3.48
16	13 S - 14 N	102 W - 103 E	92	3.14	2.79	2.88	2.29	1.98	2.56	2.45	2.56	1.85	2.18	3.04	3.45	2.59
17	13 S - 14 N	103 W - 104 E	24	3.17	2.83	2.85	2.24	1.92	2.43	2.32	2.43	1.77	2.12	3.00	3.39	2.53
18	13 S - 14 N	104 W - 105 E	70	3.19	2.87	2.83	2.19	1.85	2.30	2.20	2.31	1.67	2.07	2.97	3.33	2.48
19	13 S - 14 N	105 W - 106 E	71	3.49	3.11	2.99	2.22	1.85	2.42	2.32	2.48	1.77	2.23	3.24	3.58	2.64
20	13 S - 14 N	106 W - 107 E	107	4.08	3.56	3.35	2.35	1.93	2.78	2.70	2.94	2.04	2.60	3.83	4.13	3.02
21	13 S - 14 N	107 W - 108 E	221	4.66	4.01	3.70	2.48	2.01	3.14	3.08	3.40	2.31	2.97	4.41	4.68	3.40
23	14 S - 15 N	103 W - 104 E	131	2.85	2.56	2.63	2.09	1.79	2.19	2.11	2.18	1.56	1.91	2.69	2.98	2.29
24	14 S - 15 N	104 W - 105 E	126	3.07	2.77	2.74	2.14	1.82	2.22	2.12	2.21	1.60	1.99	2.85	3.16	2.39
26	14 S - 15 N	106 W - 107 E	304	4.00	3.53	3.36	2.41	1.95	2.74	2.64	2.83	2.03	2.73	3.86	4.08	3.01
27	14 S - 15 N	107 W - 108 E	660	4.53	3.96	3.73	2.58	2.03	3.08	2.98	3.24	2.31	3.20	4.49	4.64	3.39
Average				3.26	2.92	2.91	2.16	1.87	2.52	2.47	2.62	1.87	2.23	3.23	3.51	2.63

Data Source : [http:// eosweb.larc.nasa.gov](http://eosweb.larc.nasa.gov)

Note : Vegetation type crop : 20-m brodleaf - deciduous trees (10%) & Crops (Like rice, wheat)

3. 衛星日射量資料のキャリブレーション

1. Sihanouk Ville および Kampong Cham province での地上日射量

カンボジアでは数箇所において地上日射量が記録されている。そのうちの二箇所のサイトから記録された日射量を 2005 年 6 月に入手できた。地上日射量データは以下の 2 つの観測所から回収した。

- (i) Sihanouk Ville (SHV)
水供給公社の水道供給センターの屋根に観測記録機器を設置して、日射量を記録している。
- (ii) Kampong Cham (Kg. Cham)
MIME および NEDO が太陽光 (PV) + マイクロ hidro (MH) のハイブリッドの実証実験サイトで、日射量を記録している。

上記のサイトで記録された日射量データは、南向き 12 度の傾斜面での日射量である。

表 1 と表 2 は、上記二つのサイトの日射量記録のサマリーを示す。添付資料—1 および添付資料—2 に全データを添付する。

表 1 WTSC (Sihanouk Ville province) の日射量記録

Recorded average solar irradiation at WTSC of Sihanouk Ville (kWh/m ² /day)													
Year / month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
2003	***	***	***	***	***	***	***	4.03	3.69	4.09	5.00	5.18	4.40
2004	4.82	5.28	5.68	---	4.14	4.24	3.57	3.63	---	4.92	5.03	5.52	4.68
2005	5.28	5.80	5.43	5.11	4.03	***	***	***	***	***	***	***	5.13
Average	5.05	5.54	5.55	5.11	4.08	4.24	3.57	3.83	3.69	4.51	5.01	5.35	4.63

出典：調査団

Note: (1) '***' データ不入手 (2) '---' データ記録エラー (3) 全てのデータは SHV サイトから回収

上表より、年平均日射量は 4.6 kWh/m²/日以上であるが、9 月から 4 月までの月平均日射量は 5.0 kWh/m²/日と年平均より高く、逆に雨期の 7 月から 9 月には日射量は低下し、3.9 kWh/m²/日を下回る。雨期では月平均の日射量は低下するが、東京の年平均水平面日射量 3.5kWh/m²/日より大きい。

表 2 Kampong Cham の日射量記録

Recorded average solar irradiation at Kampong Cham province PV & MH project site (kWh/m ² /day)													
Year/Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Average
2004	***	***	***	***	***	***	***	4.58	4.64	5.46	5.44	5.76	5.18
2005	5.40	5.81	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	5.60
Average	5.40	5.81	***	***	***	***	***	4.58	4.64	5.46	5.44	5.76	5.30

出典：調査団

Note: (1) '***' データ不入手 (2) 2004 年 8 月から 12 月分のデータはサイト回収 (3) 2005 年 1 月と 2 月のデータは NEDO (日本) から入手された値

Kampong Cham の場合 8 月と 9 月を除いて、月平均日射量は 5.0 kWh/m²/日より大きい。3 月から 7 月までのデータはないが、年平均の値は SHV と比べて大きい。

2. Sihanouk Ville (SHV)および Kampong Cham の衛星データ

衛星日射量データをNASAホームページより入手し、SHV および Kg. Cham 地点での日射量を補間法により求めた。入手した衛星観測データは各地点の水平面平均日射量を示す。毎年天候により年平均日射量は多少変動する。そのため、記録年数が長いほどデータの信頼性は高くなる。入手した衛星日射量データは1983年から1993年の10年間の月平均値である。

表3は、この10年間の両地点での月平均日射量データと、最低値および最高値の月平均値からの変動量(%)を示す。

表3 SHV および Kg. Cham の月平均日射量と変動範囲

Months	Satellite data of SHV area			Satellite data of Kg. Cham area		
	Solar irradiation (kWh/m ² /day)	Differences in respective months daily average irradiation data for 10 Years		Solar irradiation (Wh/m ² /day)	Differences in respective monthly, daily average irradiation data for 10 Years	
		Minimum (%)	Maximum (%)		Minimum (%)	Maximum (%)
January	5.35	-7	6	5.39	-5	4
February	5.98	-5	7	5.87	-3	3
March	6.21	-5	5	6.03	-7	5
April	5.96	-8	7	6.01	-4	3
May	5.09	-11	9	5.62	-5	5
June	4.28	-20	18	5.18	-11	10
July	4.34	-22	15	5.25	-13	7
August	3.84	-18	22	4.90	-10	10
September	4.26	-31	13	4.76	-7	9
October	4.54	-8	10	4.70	-10	7
November	5.12	-15	10	4.96	-11	9
December	5.35	-6	6	5.11	-4	5
Annual Average	5.03	-13.0	10.7	5.32	-7.5	6.4

出典：NASAホームページ

上表は、10年間の平均値からの最高および最低記録の変動範囲を示すものである。これより、SHV地域では各月の平均値と比べて9月に最低の-31%となり、8月に最高の+22%の変動があることが分かる。年平均値で見ると、最高および最低値と平均値の差が+10.7%と-13%である。Kg. Chamの場合、月平均値に比べて7月に最低の-13%となり、6月に最高の+10%となる。年平均では、最高および最低はそれぞれ+6.4%と-7.5%である。以上から、平均値との差が雨期に大きく、また最高値との差より最低値との差(絶対値)が大きいことが分かる。

3. 衛星データと地上観測データの比較

傾斜面での地上観測日射量を、水平面に対する衛星日射量データと直接比較することはできない。水平面衛星データをTilt Factor (F_T)を利用し、12度の傾斜面で受光する値に変換する。Tilt Factorは太陽のAzimuth angleを利用し算出する。地上データおよび衛星データの比較は、それぞれの地点の傾斜面の日射量で行った。

表4と図1および表5と図2に、SHVおよびKg. Cham地域で12度の傾斜面上で記録された地上観測データと、12度の傾斜面に変換された衛星換算データを示す。表4および表5の最低および最高値は、表3の最低および最高値の変動割合を利用し算出したものである。

表4 SHVの地上観測記録および衛星データ

Months	10 years average Satellite solar irradiation (Min. & Max. Values are calculated using % of differences from Table-3)			Tilt factor (T_F) to calculate the value at 12 deg inclined angle	Satellite data converted to 12 degree inclined angle using tilt factor (Estimated Values)			Measured surface data at 12 degree inclined angle (kWh/m ² /day)
	Average (kWh/m ² /day)	Minimum side (kWh/m ² /day)	Maximum side (kWh/m ² /day)		Average (kWh/m ² /day)	Minimum side (kWh/m ² /day)	Maximum side (kWh/m ² /day)	
January	5.35	4.98	5.67	1.14	6.10	5.67	6.46	5.05
February	5.98	5.68	6.40	1.09	6.52	6.19	6.97	5.54
March	6.21	5.90	6.52	1.05	6.52	6.19	6.85	5.55
April	5.96	5.48	6.38	1.00	5.96	5.48	6.38	5.11
May	5.09	4.53	5.55	0.98	4.99	4.44	5.44	4.08
June	4.28	3.42	5.05	0.97	4.15	3.32	4.90	4.24
July	4.34	3.39	4.99	0.98	4.25	3.32	4.89	3.57
August	3.84	3.15	4.68	1.00	3.84	3.15	4.68	3.83
September	4.26	2.94	4.81	1.03	4.39	3.03	4.96	3.69
October	4.54	4.18	4.99	1.07	4.86	4.47	5.34	4.51
November	5.12	4.35	5.63	1.12	5.73	4.87	6.31	5.01
December	5.35	5.03	5.67	1.15	6.15	5.78	6.52	5.35
Average	5.03	4.42	5.53	1.05	5.29	4.66	5.81	4.63

Note : Measured monthly data is from 2003 Aug to 2005 May.

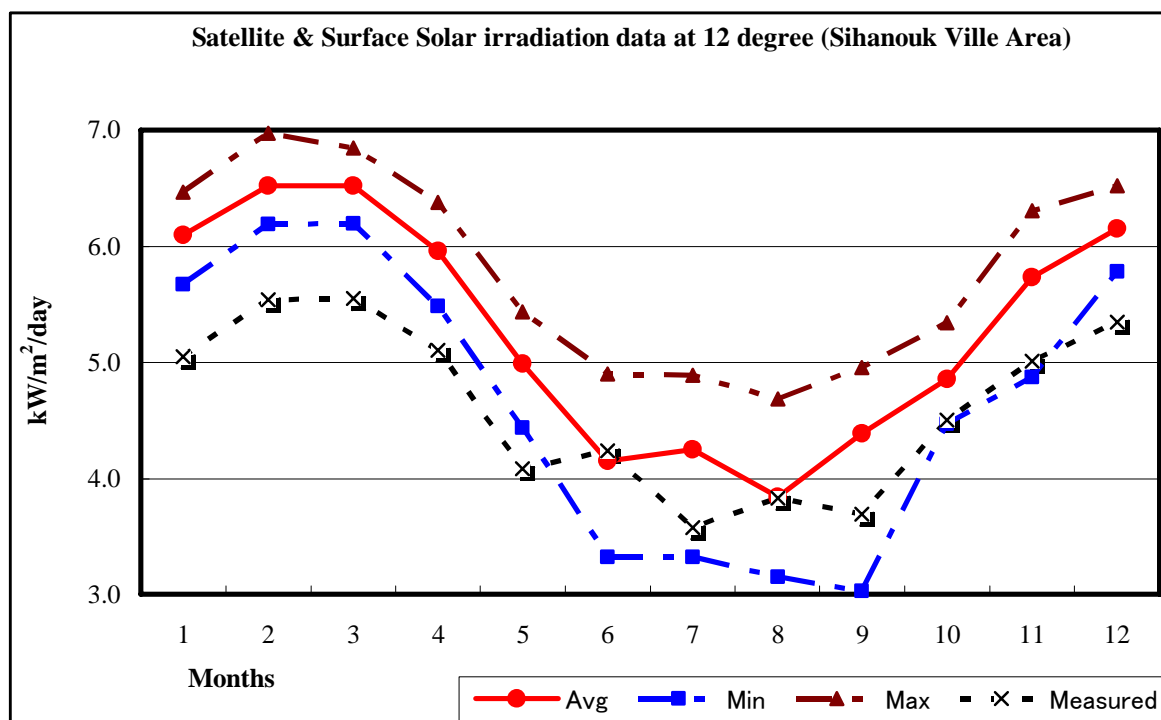


図1 SHVの傾斜面衛星日射量および地上観測記録

12月から5月までは、地上記録が衛星換算値より小さい。6月には地上記録が衛星換算値より多少小さいが、日射量がさらに低下する7月から9月の雨期月には、地上記録が衛星換算値の月平均および月最低値のレンジの中にあることが分かる。

表5 Kg. Cham の地上観測記録および衛星データ

Months	10 years average Satellite solar irradiation (Min. & Max. Values are calculated using % of differences from Table-3)			Tilt factor (T_F) to calculate the value at 12 deg inclined angle	Satellite data converted to 12 degree inclined angle using tilt factor (Estimated Values)			Measured surface data at 12 degree inclined angle (kWh/m ² /day)
	Average (kWh/m ² /day)	Minimum side (kWh/m ² /day)	Minimum side (kWh/m ² /day)		Average (kWh/m ² /day)	Minimum side (kWh/m ² /day)	Maximum side (kWh/m ² /day)	
January	5.39	5.12	5.61	1.15	6.20	5.89	6.45	5.40
February	5.87	5.69	6.05	1.10	6.46	6.26	6.65	5.81
March	6.03	5.61	6.33	1.05	6.33	5.89	6.65	
April	6.01	5.77	6.19	1.01	6.07	5.83	6.25	
May	5.62	5.34	5.90	0.98	5.51	5.23	5.78	
June	5.18	4.61	5.70	0.97	5.02	4.47	5.53	
July	5.25	4.57	5.62	0.98	5.15	4.48	5.51	
August	4.90	4.41	5.39	1.01	4.95	4.45	5.44	4.58
September	4.76	4.43	5.19	1.03	4.90	4.56	5.34	4.64
October	4.70	4.23	5.03	1.08	5.08	4.57	5.43	5.46
November	4.96	4.41	5.41	1.13	5.60	4.99	6.11	5.44
December	5.11	4.91	5.37	1.16	5.93	5.69	6.22	5.76
Average	5.32	4.92	5.65	1.05	5.60	5.19	5.95	5.30

Notes: (1) Measured monthly data are from 2004 Aug. to 2005 Feb.

(3) Blank means no data available or not appropriate to take as an average.

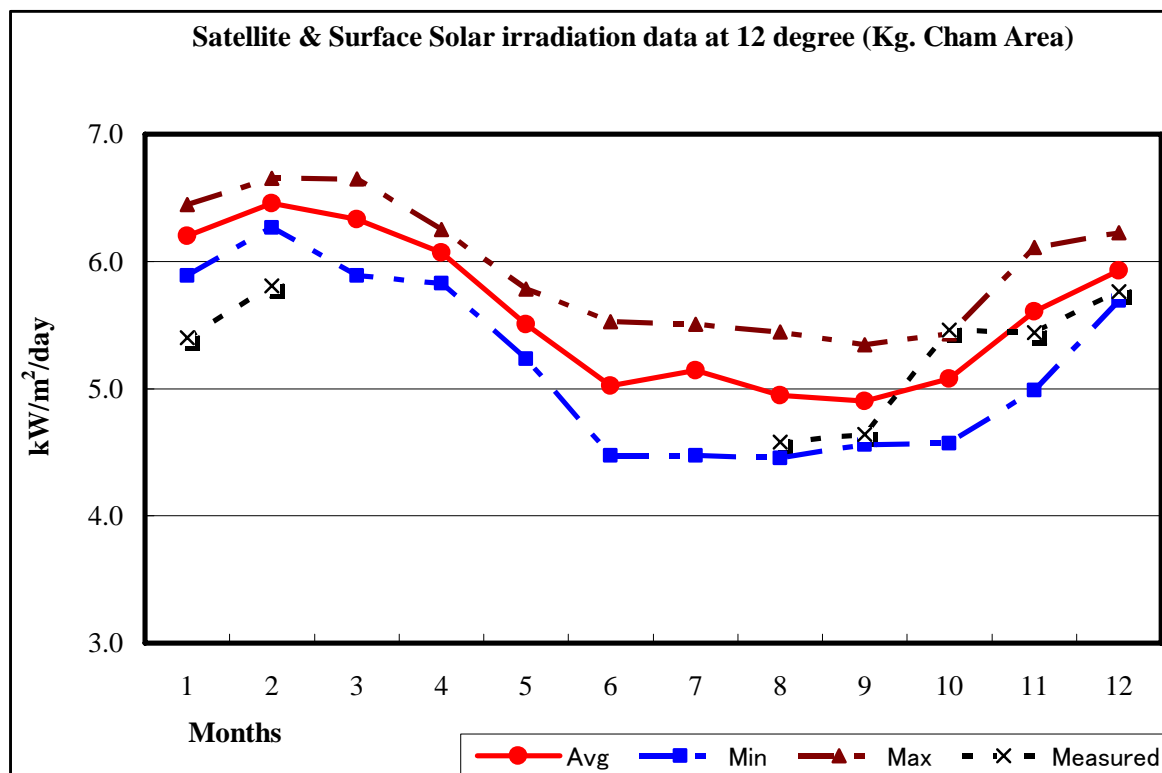


図2 Kg. Cham の傾斜面衛星日射量および地上観測記録

1月と2月では、地上記録値が衛星換算の最低値より小さいが、8月から12月では地上記録が衛星換算の平均および最低のレンジの中にほぼあることが分かる（10月には、地上記録が衛星換算の最高値よりも多少大きい）。Kampong Chamでは3月から7月までの地上記録がないため、比較できない。

4. まとめ

両地点での地上観測記録は、雨期以外には衛星換算値の最低値より少なく、雨期には逆に衛星換算の最低値より多少大きいと言える。

Sihanouk Ville では、衛星換算の年平均（5.29）より地上記録の年平均（4.63）が 13%低い。衛星換算の月最低値の年平均（4.66）は同年平均（5.29）より 12%低い。Kampong Cham では、衛星換算の年平均（5.60）より地上記録の年平均（5.30）が 5%低い。また衛星換算の月最低値の年平均（5.19）が同年平均（5.60）より 8%低い。地上データは短期間の記録しかないが、この2つの場所では、地上観測記録が衛星換算の月平均および月最低のほぼ中間にある。

また、太陽光パネルの出力が低下し需給バランスがクリティカルとなる雨季には、地上観測の平均値は衛星換算の最低値より大きい（図1、2参照）。一方、乾季には逆に、地上観測の平均値が衛星換算の最低値よりも小さい。したがって、太陽光パネルの雨季出力が極めて重要となる計画では、衛星換算の月最低値を用いれば安全側となる。ただし図1に示されるように、雨季中の6-8月には、地上実測の月平均値と衛星換算の月平均値の間に大きな差はない。したがって、太陽光BCSやSHSの設計において、衛星換算データの、特に雨季中の月平均値を用いることには、特別支障はないと考えられる。

長期間衛星で記録した値は、経年的な気象変化も反映している。以上の考察から、太陽光システムを計画するために衛星データを利用することは妥当と考えられる。

Attachment-1

Solar irradiation data of SHV (WTSC) (Unit : kWh/m²/day)

Date	Year 2003					Year 2004										Year 2005						
	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
1	5.85	5.51	4.35	3.11	5.80	5.86	4.85	5.38	---	---	6.07	3.83	0.89	---	---	5.25	6.11	5.20	5.48	5.54	6.31	6.70
2	2.69	5.06	5.51	5.70	5.83	5.13	4.47	6.02	---	---	4.10	2.15	1.29	---	---	3.55	5.30	5.97	5.66	5.06	4.10	6.22
3	2.24	2.37	4.65	5.22	6.00	5.77	6.17	6.44	---	---	4.55	4.78	3.94	---	---	5.52	4.79	5.84	5.81	5.11	6.22	6.34
4	3.94	1.46	3.26	4.57	6.14	4.99	5.30	5.31	---	---	5.24	2.49	4.51	---	1.79	6.46	5.42	5.73	5.78	5.09	5.41	5.43
5	0.99	6.09	3.75	5.55	4.40	4.12	5.17	4.08	---	4.56	5.98	5.59	4.83	---	2.25	5.54	6.18	5.04	4.80	4.44	4.50	6.19
6	0.43	5.33	5.09	6.09	5.58	5.62	6.21	4.59	---	4.99	5.57	4.93	4.76	---	2.82	3.04	5.68	4.64	6.07	5.79	5.24	6.15
7	4.36	3.52	5.92	5.71	6.12	3.77	6.15	4.62	---	4.87	4.17	4.39	0.91	---	4.58	4.40	5.66	5.61	4.92	5.42	4.57	5.70
8	6.20	2.76	3.39	5.91	6.04	5.75	5.54	5.15	---	3.88	2.61	5.05	1.48	---	5.24	2.49	5.77	5.31	6.17	5.66	6.57	2.48
9	3.87	1.44	3.17	3.98	2.90	3.15	4.02	6.59	---	5.21	1.60	4.20	1.52	---	4.56	5.28	5.64	2.75	5.89	5.44	5.67	1.83
10	4.54	0.99	5.56	4.21	3.46	5.97	5.85	5.92	---	3.28	2.68	4.49	4.08	---	5.73	3.55	5.42	5.55	4.53	6.54	4.82	1.39
11	5.36	2.52	5.60	5.00	5.14	4.73	5.46	4.68	---	2.33	2.83	5.06	1.76	---	6.21	4.01	6.05	5.15	5.80	6.32	4.53	1.19
12	4.75	2.48	4.58	4.16	5.71	4.34	5.57	6.46	---	3.30	2.16	3.46	2.68	---	0.89	5.67	5.94	5.61	5.51	6.58	6.40	1.63
13	4.25	2.05	3.50	2.95	6.03	3.37	5.99	5.88	---	0.63	0.62	3.81	6.29	---	4.66	5.28	6.09	5.05	6.06	5.89	5.04	3.56
14	5.94	4.89	3.24	5.01	4.57	4.42	5.74	5.68	---	5.37	1.44	6.54	6.36	---	6.14	4.26	5.71	1.27	5.98	4.78	5.49	1.59
15	4.52	6.01	3.41	5.40	6.11	4.25	3.76	6.65	---	5.05	2.14	5.37	6.37	---	6.23	4.28	6.01	5.60	5.56	5.28	3.78	4.88
16	4.65	5.05	2.21	4.64	4.89	4.53	5.11	6.14	---	4.05	4.05	4.47	6.46	---	4.77	5.11	5.78	5.71	5.11	6.08	2.99	5.72
17	2.10	3.57	4.26	4.33	4.81	4.44	4.27	7.01	---	3.40	5.43	5.39	3.59	---	5.61	4.72	6.01	5.01	6.70	5.01	6.04	4.05
18	3.08	2.84	1.38	5.11	4.30	5.15	4.77	5.24	---	5.54	6.11	3.46	1.91	---	4.49	5.11	5.22	5.82	6.16	6.04	4.04	2.79
19	1.35	4.43	4.02	6.30	2.33	4.35	4.72	4.53	---	6.19	5.34	1.87	1.98	---	4.90	6.19	5.09	5.87	6.27	5.32	5.21	4.20
20	1.67	4.36	3.05	5.85	4.07	3.47	5.23	4.41	---	6.49	2.27	0.89	1.93	---	5.77	6.35	5.63	5.92	5.18	4.48	4.39	4.91
21	3.66	4.67	1.88	5.40	5.72	5.43	5.40	5.32	---	4.47	4.09	2.36	1.80	---	4.97	6.19	3.76	6.18	5.50	6.22	3.89	3.68
22	4.80	1.63	1.20	2.81	4.85	3.67	5.31	5.37	---	3.47	5.57	4.54	2.99	---	4.58	6.04	4.93	5.60	4.87	5.55	3.54	2.45
23	6.07	4.61	3.97	5.47	5.98	5.52	5.72	6.09	---	1.26	4.00	4.06	3.18	---	5.64	6.40	5.68	5.73	5.77	4.34	4.33	4.63
24	5.34	4.24	2.24	4.41	6.08	6.01	5.78	6.34	---	1.35	5.97	3.92	5.76	---	4.71	5.83	5.58	6.25	6.34	4.29	6.06	3.26
25	5.18	4.43	2.52	4.11	5.60	5.26	6.15	5.33	---	0.63	6.17	1.81	5.65	---	6.51	2.94	5.65	4.74	6.71	3.75	5.49	5.04
26	5.93	3.51	6.07	4.80	4.58	5.39	6.07	6.69	---	3.73	5.58	2.15	5.19	---	5.65	4.80	5.32	3.84	6.96	5.07	5.55	5.45
27	6.82	5.40	5.82	6.18	5.86	6.13	5.46	6.74	---	6.07	4.37	1.86	3.76	---	6.39	4.25	5.54	5.72	6.81	5.47	6.11	3.96
28	6.21	3.65	6.23	6.21	5.63	3.01	6.00	5.88	---	6.46	5.23	1.32	5.30	---	4.99	5.97	5.69	5.87	5.88	6.12	5.72	1.30
29	4.20	2.44	5.76	5.71	4.41	5.35	3.01	6.10	---	5.00	6.07	2.92	2.46	---	6.20	6.37	4.93	5.88		5.43	6.26	3.28
30	1.35	3.36	5.52	5.95	5.76	4.60		5.69	---	5.86	5.26	1.12	2.60	---	5.81	6.04	5.31	5.40		6.36	4.93	4.36
31	2.56		5.68		5.80	5.95		5.73		4.27		2.51	6.24		5.73		5.24	5.77		5.79		4.63
Avg.	4.03	3.69	4.09	5.00	5.18	4.82	5.28	5.68	---	4.14	4.24	3.57	3.63	---	4.92	5.03	5.52	5.28	5.80	5.43	5.11	4.03

Note: (1) '***' no data
 (2) '---' data recording failure
 (3) The inclined angle of Pyranometer is 12 degree facing south.

添付資料-2

Attachment-2

Solar irradiation data of Kampong Cham project site
(kWh/m²/day)

Date	Year 2004									2005
	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	
1	***	4.76	---	3.59	5.81	5.25	5.12	6.38	5.81	
2	***	5.08	---	3.29	5.61	4.85	5.71	6.23	6.53	
3	***	5.94	---	3.53	3.16	3.92	5.52	4.90	6.51	
4	***	5.49	---	3.48	5.37	4.63	6.57	6.00	6.34	
5	***	5.52	---	5.84	6.08	3.75	5.64	5.52	6.10	
6	***	3.98	---	4.78	5.97	3.25	4.38	6.38	6.22	
7	***	4.83	---	5.61	6.32	4.81	6.35	5.26	3.56	
8	***	5.76	---	5.10	4.88	5.50	6.18	5.92	5.55	
9	***	3.61	2.17	4.91	***	6.06	6.66	4.67	6.10	
10	***	5.62	1.77	4.38	***	6.28	5.58	5.66	6.47	
11	***	4.11	2.28	4.94	4.89	5.65	3.57	5.15	6.42	
12	***	3.93	3.07	2.83	4.36	3.83	***	6.09	5.43	
13	***	3.70	2.64	2.21	1.18	6.09	5.48	5.16	4.03	
14	***	1.51	0.00	4.90	3.12	6.23	5.48	6.44	4.84	
15	***	---	2.84	4.50	4.32	5.78	4.84	6.36	3.81	
16	***	---	5.55	6.21	4.81	6.64	4.35	6.21	3.96	
17	***	---	5.82	6.46	2.50	6.26	6.18	5.89	4.65	
18	***	---	4.89	4.44	4.50	3.68	5.56	5.47	4.80	
19	***	---	4.45	2.52	4.11	6.20	6.00	5.50	***	
20	***	---	4.90	1.99	4.04	5.75	6.15	6.24	***	
21	***	---	3.96	3.27	4.63	5.57	6.19	4.99	***	
22	***	---	4.86	4.62	3.87	5.60	6.35	5.01	***	
23	***	---	4.61	5.50	5.84	5.82	5.63	5.76	***	
24	***	---	5.27	6.20	6.81	5.65	4.60	5.29	***	
25	***	---	5.49	6.47	4.66	4.84	5.13	5.86	***	
26	***	---	5.06	6.05	4.77	6.80	2.73	6.14	***	
27	***	---	4.11	5.59	5.29	6.27	5.07	6.45	***	
28	***	---	3.86	4.66	6.41	6.23	5.56	6.19	***	
29	6.93	---	5.50	4.94	4.68	6.18	5.46	6.35	***	
30	1.08	---	5.51	4.64	2.10	6.27	5.79	5.66	***	
31	1.11		4.96	4.63	4.54	5.48	5.40	5.43	***	
Avg.	3.04	4.56	4.07	4.58	4.64	5.46	5.44	5.76	5.39	

Note:

- (1) '***' no data
- (2) '---' data not recorded.
- (3) Data available from 8th May. Therefore data is not counted as an average value of the month.
- (4) Whole system was stopped for maintenance from 15th June.
Therefore value is not counted as an average value of the month.
- (5) After maintenance, system started from evening of 8th July.
Therefore value is not counted as an average value of the month.
- (6) In September
 - (a) Data collected on 9th after 14:40:18 and recording restarted at 18:29:06 hours.
 - (b) Data recording stopped on 10th after 03:59:59 hours.
 - (c) Data recording started on 10th from 15:33:48 and collected on 17th after 19:09:04 hours.
 - (d) Data recording started on 17th from 20:12:22 hours.
- (7) Data collected on 12th November 2004, 18:23:59 and recording restarted from 20: 58:15 hours.
- (8) In January data is only up to 19th (18:59:59 hours).
Therefore data is not counted as an average value of the month.
- (9) The inclined angle of Pyranometer is 12 degree facing south.

付属資料-C

バイオマス発電

カンボジア国
再生可能エネルギー利用地方電化マスタープラン調査

ファイナルレポート
第5巻 付属資料

目次

付属資料-C バイオマス発電

付属資料-C.....AC-1

1. カンボジアでなぜバイオマス発電か AC-1

1.1. バイオマス発電の諸形式 ～ なぜガス化発電か ～ AC-1

1.2. オフグリッド地域のミニグリッド電源の必要条件 AC-2

2. カンボジアのバイオマス資源 AC-7

3. 燃料木栽培計画 AC-7

3.1 必要な植栽面積 AC-7

3.2 CECによる買取 AC-8

3.3 適性樹種 AC-8

3.4 栽培形態 AC-8

3.5 苗木の供給 AC-10

3.6 生態的持続性 AC-11

4. ガス化発電機材 AC-12

4.1 ガス化とは? AC-12

4.2 ガス化炉の種類 AC-12

4.3 ダウンドラフト型 AC-13

4.4 生成ガスによる発電 AC-14

4.5 アジアにおける普及状況 AC-15

4.6 安全性と環境影響 AC-15

4.7 地方電化・給水への適用事例（インド、カンボジア） AC-17

4.8 バイオマスガス化発電装置・製品比較 AC-20

4.9 ライセンス生産、合弁生産 AC-23

5. BIOMASS GASIFIER POWER GENERATION SYSTEM AC-26

6. REPORT OF PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY OF BIOMASS FUEL PRODUCTION AC-27

付表目次

Table AP-C.1.1 オフグリッド地域の電源の必要条件 AC-2

Table AP-C.1.2 再生可能エネルギーの地方電化電源としてのポテンシャル AC-3

Table AP-C.1.3 ミニグリッド電源の比較 AC-4

Table AP-C.1.4 バイオマス発電パイロットの検証課題 AC-6

Table AP-C.3.1 季節的に冠水する土地に生育する樹種 AC-10

Table AP-C.4.1 ガス化炉の代表的な型式の特徴の比較 AC-13

Table AP-C.4.2 ゴサバ島地方電化の諸元 AC-18

Table AP-C.4.3 ガス化発電システム製造元の比較..... AC-22
 Table AP-C.4.4 地方電化の候補製品の仕様比較..... AC-23
 Table AP-C.4.5 インド A 製造元ガス化発電システムの主な導入先リスト..... AC-25

付図目次

Figure AP-C.4.1 ダウンドラフト型ガス化炉の概念図..... AP-14
 Figure AP-C.4.2 生成ガスがエンジンに送り込まれるまでの流れ..... AP-15
 Figure AP-C.4.3 ゴサバ島エネルギー組合の 5 x 100 kW_e バイオマスガス化炉 AP-17
 Figure AP-C.4.4 アンロンタメイ村バイオマス発電事業の開始後の電力消費量の推移 AP-18
 Figure AP-C.4.5 アンロンタメイ村バイオマス電気組合事業..... AP-20
 Figure AP-C.4.6 A 製造元の 40kW_e バイオマスガス化発電システム..... AP-21
 Figure AP-C.5.1 Biomass Gasifier Power Generation System AP-26

1. カンボジアでなぜバイオマス発電か

1.1. バイオマス発電の諸形式 ～ なぜガス化発電か ～

現在、世界の年間エネルギー需要はおよそ 400EJ と推定され (Goldemberg 2000)、そのうちの 55EJ 程度がバイオマスによって賄われている。地球温暖化や石油資源の枯渇などの人類規模での問題に対し、バイオマスエネルギーの利用は主要な対抗策であり、今後その利用が促進されていくであろうと、影響力を持つ多くの国際機関が予測している。IPCC (1995) はバイオマスエネルギーの利用を 2050 年には 280EJ、2100 年には 320EJ に達すると予測している。2050 年のバイオマスエネルギー利用を Shell International (1996) は 200-220EJ と予測し、Greenpeace (1993) は 181EJ と予測している。また Hoogwijk らは IPCC の Special Report on Emission Scenarios などのデータを基に将来のバイオマスエネルギーのポテンシャルを予測し、2050 年のバイオマスエネルギーの持続可能な利用のポテンシャルは、石油に換算すると現在の消費量の数倍に当たるとする論文を 2005 年 7 月に発表している。このような情勢の中、世界中でバイオマスエネルギー技術の開発と利用が進められており、多岐にわたるバイオマスエネルギー技術の中でカンボジアの地方電化への利用に適した技術について検証する。

(1) 直接燃焼方式とガス化方式

固形バイオマスを利用して発電する場合、大きく分けて直接燃焼方式とガス化方式の 2 つの方法がある。直接燃焼方式はバイオマスをエネルギーに変換する最も一般的な方法である。発電に利用するためには熱によって蒸気を発生させ、その蒸気によってタービン発電機を回転させて発電を行う。この方式は木材を燃料とするほか、サトウキビの加工工場や精米施設において発生するバガスや籾殻などの廃棄物を利用して、工場の電力供給を賄うなどの形で広く導入されている。ただし、この方式が適するのは 1MW 級超の比較的大きな規模の発電であり、カンボジアの地方電化には不向きである。

ガス化は熱化学プロセスによりバイオマスをプロデューサーガスと呼ばれる可燃性ガスに変換することで、発生したガスはバイオマスの 80% のエネルギーを包含する。プロデューサーガスは冷却機と清浄機を通った後にガスエンジンに送られて、発電を行う。直接燃焼方式よりも燃料効率が良く、近年になって世界中で盛んに導入されるようになった。ガス化発電システムは 4kW 程度から商品が発売・利用され、一部の小型機については完成した技術として認識されており、カンボジアの地方電化にも適用できる可能性が高い。ガス化のシステムに関しては「4. ガス化発電機材」に詳述する。

(2) バイオガス発電

家畜の糞などを発酵させ、発生したメタンガスを利用して発電する方法を指す。先進国では導入が進みつつあるが、政府の財政支援無しでは採算をとることは難しい状況である。カンボジアにおいても NEDO による太陽光とバイオガスのハイブリッド発電施設が建設されているが、技術的実証施設であり、経済的に導入可能なレベルには達していない。また、カンボジア地方部に

は大規模な畜舎を営んでいるケースは稀で、牛などは放し飼いにされるケースが殆どであり、現状ではバイオガス発電をカンボジアの地方電化に広く普及させることは困難と考えられる。またカンボジアでは低価格(1世帯用<\$50)のバイオガスシステムが家庭調理用として、NGOなどによって農村部で広く普及が進みつつあり、当面はそれらの利用がより適していると言えよう。

(3) バイオオイル

世界中で様々なバイオオイル製品の開発利用が進められている。その中でカンボジアの地方電化に利用できそうな方法として、バイオディーゼルを既存のディーゼル発電機の燃料として利用することがあげられる。EU や米国ではトウモロコシ、大豆、菜種などを原料としての生産が盛んであり市場での取引が進みつつある。熱帯アジアにおいてはフィリピン、タイなどでココナッツパームやオイルパームを原料として、インドでは *Jatropha* というトウダイグサ科の低木の種子を原料としての生産量が増加している。いずれも軽油との混合利用が多く、また政策的な支援無しでは価格では不利な状況である。カンボジアでバイオディーゼルの原料となる作物の栽培を奨励し、大規模な精製工場を設置し、国内で流通させるというのは、興味深い一案ではあるが、国のエネルギー政策としてはともかく、地方電化推進の政策範疇には入らないと判断する。一方、コミュニティレベルで *Jatropha* を栽培して利用するという取り組みが、カナダからの経済支援を得て Development of Appropriate Technology (DATE)という NGO によって進められており、簡単な機材で抽出したバイオディーゼルでエンジンを駆動させるのに成功しているが、長時間駆動させた場合のエンジンへの影響や経済性などは不明で、技術的に普及段階とは言えず、大変興味深い事例ではあるが、広く導入を推奨できる段階には達していない。

1.2 オフグリッド地域のミニグリッド電源の必要条件

Table AP-C.1.1 オフグリッド地域の電源の必要条件

No.	項目	ディーゼル	小水力	太陽光	バイオマス
1.	運転・維持管理が、訓練を受けた村落住民で可能	○	○	○	○
2.	燃料が不要か、持続的に購入・調達可能	△ ¹	○	○	○ (栽培型)
3.	投資額が、支払能力(月 3-5 ドル)以内の料金で回収可能 (必要条件)	○ ローン	△ (高率補助金とソフトローン)	△ (全額補助金)	△ (ソフトローン)
4.	分散型独立電源として必要な規模(10-200 kW)の発電が可能	○	○	× ²	○
5.	発電原価 ³ (\$/kWh) 設備利用率 15%	0.59	0.85 ⁴	-	0.56

¹ 価格高騰、雨季中に道路閉鎖等による供給不足リスクがある。
² 技術的には可能、経済的に非現実的
³ 税込み、需要家端
⁴ 滝を利用した経済性の高い案件では 20 セント程度のポテンシャルもある。

	同 30%	0.40	0.40	-	0.28
6.	3相交流電力を供給可能				

注：○ 可能、△ 条件付で可能、× 不可

(1) カンボジアの再生可能エネルギー概観

カンボジア国における再生可能エネルギーのオフグリッド地域の分散型電源としてのポテンシャルとその特徴を Table AP-C.1.2 にまとめる。

Table AP-C.1.2 再生可能エネルギーの地方電化電源としてのポテンシャル

No.	ポテンシャルの特徴
1.	<p>小水力（ミニグリッド）</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ カンボジアにおける小水力ポテンシャルは山地・丘陵地域に限られ、平地部ではポテンシャルがない。そのため、ポテンシャルはあっても、近隣に需要地となる村落がない地点がある。 ■ 山地・丘陵地域では、村落の分布密度が疎で、村落規模も一般に小さい。その結果、ポテンシャルと比べて需要に限られる地点がある。 ■ 支払い能力が低いため、近隣にポテンシャルがあっても、まずは太陽光 BCS によるバッテリー照明を先行すべきと判断された村落もある。 ■ 落差と雨季の流量はあっても、乾季の流量低下が著しく、乾季末の出力が大きく減少し、需要を満たせない地点がある。 ■ モンドルキリ州などは別として、丘陵地域では一般的に勾配が緩やかなため、落差を開発・利用するために水路延長が長くなり、建設費が増大する。 ■ 以上の結果、オフグリッド地域の分散型ミニグリッドの電源としての適地が限られる。
2.	<p>太陽光（BCS、SHS）</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 全国で豊富（月最低値の年平均 4.7 kWh/m²/day）
3.	<p>風力（BCS、SHS）</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 地上高 20 m で平均風速 2.6 m/s と乏しく、利用は一部の風回廊に限られる。
4.	<p>バイオマス（ミニグリッド）</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ カンボジアは、日射量、降雨、土地資源に恵まれるため、バイオマス資源は全国的に豊富で、その栽培ポテンシャルも高い。 ■ 本 MP で提唱する農家との契約栽培方式で燃料を調達する場合、発電所は需要地に設置可能であり、場所を選ばない。 ■ 燃料は植えて 1 年後から 4-6 ヶ月おきに収穫可能となるので、発電機器や配電線の調達・建設工事と平行して栽培できる。

上表に示す再生可能エネルギーのポテンシャルの観点からは、ミニグリッドの主電源はバイオマスであり、BCS の主電源は太陽光となる。小水力は、そのポテンシャルと電気需要(村落規模)が量的に釣り合い、かつ経済的に送電可能な距離内に位置する場合に、ミニグリッドの電

源となる。カンボジアにおける風力は、局地的な風回廊⁵では BCS や SHS の電源となり得るが、サイト条件に左右されるため、MP では特定困難であり、一般的な電源とはなり得ない。

(2) なぜバイオマス発電か ～小水力・ディーゼル発電との比較～

前項のポテンシャルの検討の結果、小水力、バイオマス、ディーゼル発電が、オフグリッド地域のミニグリッドの電源候補である。ディーゼル発電は、他の電源が得られないか、あるいは、乾季短期間のバックアップ目的などの設備利用率が 10% 以下の用途の場合に利用される。一般的な電源候補である、小水力、ディーゼル垂 h つ電、およびバイオマスガス化発電について、ポテンシャル以外の要素を加えて、表2にその長短を比較する。

Table AP-C.1.3 ミニグリッド電源の比較

No.	項目	小水力発電	ディーゼル発電	バイオマスガス化発電			
1.	ポテンシャル	山地・丘陵地域に限定される。	地点を選ばない（燃料の運搬路が必要）	都市部および雨季中の長期間水没地域を除き、全国で栽培可能。			
2.	技術面	完成技術	完成技術	バイオマスガス化技術全体としては実証段階から商業化の入り口。 第2次大戦型（WWII）と呼称される小型炉は、戦争中に 100 万台の実績があり、完成技術。 小型のダウンドラフト炉は、インド（木質バイオマスなど）、中国・ミャンマー（モミガラ中心）などで商業普及段階にある。			
	技術熟度						
	3 相交流				可能	可能	可能
	24 時間運転				可能	可能	困難（2 台の交互運転で可能）
	出力安定性				高い	高い	周波数変動あり ⁶
無人運転	可能（ただし、流木や落葉処理、発電記録、門番などで要員の常駐が必要となる）	可能（起動・停止は有人運転）	不可、オペレータによる有人運転が必須（燃料木のチップ化、炉への補給、周波数監視など）				
安全性	高い	事故リスクがある（CO 中毒、火災）	事故リスクがある（CO 中毒、生成ガスの引火・爆発）				
商業化	世界中に多数のメ	同左	WWII 炉はその構造上大型化は困				

⁵ 風は地形に影響され易く、強風が毎日吹く場所が谷あい、川筋、山地などで観測される場所があり、一般的にそれらは風回廊と呼称される。小水力の泉情報と同様に、MP で特定することは困難。

⁶ 既存アンロンタメイ村での 2005 年9月のメータの目視観測では、周波数変動は±1Hz 程度以内ではほぼ安定、時々-5Hz 程度まで低下した。ただし、周波数変動は、発電所の管理のために系統では厳しく管理されているが、家庭の家電製品にはほとんど影響ない。なお、地方電化の場合には需要家端での電圧降下が問題となるが、アンロンタメイ村では発電所では 400 V で安定、配電線も所要のサイズを満たしていることから、許容できない電圧降下は生じていない。

No.	項目	小水力発電	ディーゼル発電	バイオマスガス化発電
		一カーが存在		<p>難。</p> <p>2005年現在で、数社の製品が商業普及段階にある。</p> <p>中国とミャンマーでも販売されているが、モミガラ専用。</p> <p>欧米製は自動化され、クリーンだが、価格と保守技術面から地方電化には導入困難。</p> <p>アジア製は自動化されていないが、地方電化では、むしろ雇用創出効果があり、保守が容易になるというメリットがある⁷。</p>
	環境影響	取水工から発電所までの河川区間の維持用水の放流が必要。	CO ₂ 排出	森林に対する不法伐採プレッシャーの助長を避けるため、市場では燃料を購入しないことが必要。
	課題	一般的には、小さくなるほど kW 建設費が高くなる。 CEC にはポテンシャルの評価や計画が困難。	燃料価格変動リスクと、世界規模の需給逼迫時には供給が不足するリスクがある	<p>ガスクリーニング装置からの凝縮液がタールや殺菌作用（中程度の急性毒性）を持つフェノールを含むため、その最終処理方法が課題。</p> <p>エンジン排気が燃え残った CO を含む。（住宅から離れた立地、発電所内の十分な換気、ガス濃度検知器などが必要。）</p>
3.	発電設備の建設費	発電設備 \$4,000/kW	発電機器 \$500/kW	<p>発電機器 \$1,300-5,000/kW</p> <p>EU では 10 MW クラスで 3,000 ユーロ/kW、MW クラスは 6,000 ユーロ/kW</p>
	初期投資額 ⁸	\$1,229/世帯	\$424/世帯	\$592/世帯（インド製品の場合）
	発電原価 ⁹ (\$/kWh)	0.85 ¹⁰	0.59	0.56
	設備利用率 15%	0.40	0.40	0.28

⁷ 欧米での自動化は、経費低減を目的として、無人運転を可能にすることを主眼としている。たとえば、燃料木の裁断調整・乾燥・投入、灰の排出、起動・停止、監視などを自動化している。途上国に導入する場合、このような自動化機能は必要不可欠とはいえない。むしろ、複雑なメカニズムがなくなることから、構造が簡単となり、故障した場合の保守作業が容易となる。フィルター類も発電所床に並べられ、スペースを占有しているが、フィルター点検と清掃がしやすくなる。

⁸ 設計・施工管理、CEC 支援、行政経費、予備費を含む。

⁹ 税込み、需要家端

¹⁰ 滝を利用した経済性の高い案件では 20 セント程度のポテンシャルもある。

No.	項目	小水力発電	ディーゼル発電	バイオマスガス化発電
	同 30%			
	燃料費	ゼロ	\$0.23/kWh	\$0.03/kWh (コミュニティ内に還流するので、地域経済としてはゼロ)
4.	工期	2-3年	1年 (配電線)	1-2年 (ガス化炉、配電線、燃料栽培)
5.	発電機器の耐用年数	20年 (水質と仕様により 10-30年、発電機は30年)	エンジンの設計仕様により 5-10年	ガス化炉 10年程度 ¹¹ 、エンジンは設計仕様により 5-10年
6.	CECによる計画・設計の可能性	計画、設計は CEC では困難	可能 (配電線は困難)	本 MP で作成したビジュアルガイドに沿って概略計画は可能、設計は困難。
	実施	施工時に労力抛出は可能。	同左	同左
	運営	運転と事業運営は可能だが、定期点検・保守業務は困難。	同左	同左 (A社製の場合、運転と日常メンテナンス技術はディーゼル発電機と同水準)
7.	需要増に伴う増設の可否	困難 (既にポテンシャル全量を利用している場合は増設不可能)	容易	容易 (増設分の燃料の追加栽培のために、土地と契約農家の確保が必要。栽培希望者が一般に多いので、特別な支障は予見されない。)

以上の比較検討の結果、バイオマスガス化発電を、①パイロットによりそのカンボジアへの適性と技術課題を実証し、②カンボジアにおけるミニグリッドの主電源として採用することを提言する。

このパイロットで実証を求められる課題を Table AP-C.1.4 に示す。

Table AP-C.1.4 バイオマス発電パイロットの検証課題

No.	課題	備考
1.	CECによる運転・維持管理	<ul style="list-style-type: none"> ■ 計画どおりの燃料栽培ができるかモニタリング ■ 計画どおりの発電ができるかモニタリング ■ 安全手順どおりの運転ができるかモニタリング ■ 発電所内 CO濃度の測定、ガス化炉の点火前のガス管内のガス換気の履行状況など、安全面のモニタリング
2.	CECによる電気事業運営	<ul style="list-style-type: none"> ■ 検針、請求、料金徴収、会計、預金、資金

11 A社の場合、耐熱部品は運転3,000時間で交換が必要

		管理を指導・モニタリング
3.	ガス化炉の排水処理	<ul style="list-style-type: none"> ■ 土中菌によるタール（有機物）の分解能力に依存可能か、それとも沈殿・乾燥させてガス化炉で再燃焼するなどのオプションが必要か、検証する
4.	ガス化炉の運転・保守	<ul style="list-style-type: none"> ■ 運転・保守がオペレータに可能か ■ 事故停電率は許容限度内か ■ 保守作業に要する時間

2. カンボジアのバイオマス資源

カンボジアでは籾殻やゴムの廃木などの農業廃棄物が大量発生する(詳細は Part 1,5.2.1.参照)。これらもバイオマス発電燃料の貴重な資源となるが、マスタープランでは農民による燃料木栽培による燃料供給を推奨し、特に大量の余剰バイオマス廃棄物が発生する地域においてはそれらの利用も検討することとする。栽培による燃料供給を主とし、廃棄物利用を従とする理由は以下の通り。

- 農業廃棄物は一般によく利用されている。
- カンボジアにおける農産物加工工場(精米工場、砂糖やカシューナッツの加工工場など)の規模は一般に小さく、年間を通しての十分な廃棄物の発生に疑問が残ること。
- 栽培型の場合計画的、安定的燃料供給が可能。
- 栽培型においても、燃料コストの発電コストに占める割合は小さく(11%:世帯当たり月消費量 13 kWh/HH/month の場合)、農業廃棄物を利用したとしても、発電コストの大幅な引き下げにはつながらない。
- 栽培木の買い取り価格は低く(\$20/トン程度)、農業廃棄物の利用に運搬費がかかる場合などは、かえって高くなる可能性もある。
- 一般に木材がガス化燃料としては最も適している。
- 未電化村のうちの 77%にあたる 8008 村において、発電に必要なバイオマス燃料木の栽培をするのに十分な(0.02ha/HH)未利用地(グラスランド、灌木林)があることが確認された。

3. 燃料木栽培計画

3.1 必要な植栽面積

kWh 当たりの発電に必要な木材の量はおよそ 1.5kg(乾重量)である。また ha 当たりの年間バイオマス生産量は小さめに見積もっておよそ 10t程度とする(根拠については Part 2, 1-4-4.に詳述)。上記を元に必要な植林面積を算出すると、世帯当たりの月平均電力使用量が 10kWh の場合に必要な世帯当たりの植林面積は 0.018ha となる。

3.2 CECによる買取

バイオマス燃料の供給は、組合員が植林して育てた樹木を CEC が買い取る形で行なう方法が勧められる。買い取り価格はトン当たり\$20 程度が妥当であろう。この場合 kWh あたりの燃料コストは\$0.03 となる。組合員は ha 当たり少なくとも年間 10 トン程度の収量が見込めるので \$200/ha/年の収入となる。休耕地などの未利用地に植栽しておけば毎年枝を刈り取るだけでこの収入が得られるので、十分な栽培希望者の数が見込めよう。アンロンタメイ電化組合においても\$20で CEC が組合員から買い取る方式を取っているが、供給過多の状態である。

3.3 適性樹種

木質バイオマスはガス化発電に最も適したバイオマス燃料であり、殆どの樹種がガス化に適している。ただし、ごく一部の樹種にはガス化に適さないものもある。例えば熱帯地域の伐採跡地などでよく繁茂しているコショウ科の *Piper aduncum* は灰分濃度が高く、特にカリウム含有量が多いので、ガス化の際スラッジを形成する可能性があり、利用にあたっては調査が必要である。したがって、ユーカリ、アカシア、グリシディア、*Leucaena* などのすでにガス化に利用されてきた樹種の場合は問題ないが、地元で繁茂する雑木を燃料として計画する場合には、ガス化適性について試験を行なう必要がある。

3.4 栽培形態

栽培には色々な方法が考えられるが、以下の3方法に大きく分けることができる。1) 農地やその周辺で短期サイクル(<1 年)で収穫を繰り返す方法、2) やや長めのサイクルで(数年以上)収穫する方法、3) カンボジアで広がる、季節的に冠水し、農業に不適な土地における栽培。利便性などから、1)の方法が中心となると思われるが、広域ミニグリッドなどで一部の農民が多数の世帯の燃料供給を賄う場合には 2)の方法も多くとられよう。一般にそれぞれの方法がある程度組み合わせることが燃料の安定供給の面からも望ましい。以下にそれぞれの方法について詳細を記す。

(1) 農地周辺での栽培

休耕地での栽培や生け垣として畑の周辺などへの栽培、農作物との混植などを行なう場合、窒素固定を行い、旺盛な萌芽更新の特質を持った樹種が適している。マメ科の *Gliricidia sepium* や *Leucaena leucocephala* などといった熱帯のアグロフォレストリーで利用される代表的な樹種である。植栽後 1 年程度で直径数センチに成長し、収穫を開始できる。その後は年に 2-3 回、萌芽によって更新した枝を収穫することができる。木材生産量は 20-30t/ha/year が一般的に記録されており、バタンバン州では農業省の試験で *Leucaena leucocephala* が 80t/ha/year の収穫を記録している。調査団がアンロンタメイ村の植栽後一年の畑で調べた結果、木質バイオマスの生産量は 8.2t/ha/year であった。植栽後 1 年目の成長量は根の活着に時間がかかるため、2 年目以降と比べると極端に小さいので、2 年目以降は 10tを大きく上回る生産量が予想さ

れる¹²。これらの樹種は空中窒素の固定を行ない、固定した養分を落葉などにより土壤に供給するため、土壤養分の改善や有機物の供給による土壤の物理性の改善に資する。また、頻繁に枝を収穫することにより、農作物への日照の度合いを管理することができる。*Gliricidia sepium* と *Leucaena leucocephala* は葉は家畜の飼料として利用できるが、枝葉をすべて収穫してしまうと土壤への養分及び有機物の還元が少なくなり、土壤の劣化が予想される。葉も飼料として利用する場合は、持続的収穫のためには、堆肥を施肥するなどの対策をとる必要がある。

(2) 数年以上の収穫サイクルでの栽培

カンボジアでは森林局などによって、住民参加型の植林事業が各地で進められており、村落内や道路端などで植林されたユーカリやアカシアの並木が良く見られる。また、チップ用材として市場に出すアカシアやユーカリの植林地を個人で所有する人も多い。ユーカリやアカシアなども発電燃料用としての栽培に適しており、\$20/t の買い取り価格¹³であれば、チップ用材としての生産と比べても収益性は同程度であろう。ただし、上記(1)の方法とは次の点で異なることに留意する必要がある¹⁴。

- バイオマス成長量ではやや劣る場合が多い。
- 最初の収穫までに数年を要する。
- 萌芽更新する樹種も多いが、(1)の樹種ほど旺盛かつ繰り返し萌芽更新は望めないであろう。すると、収穫の頻度は減少し、定期的な再植林が必要となる。

発電用燃料としての利用の場合、樹形にはこだわる必要がまったく無く、樹木のサイズについても制約が少ないので、(1)の方法による栽培の方が容易である。したがって(2)の場合は、燃料備蓄林として、何らかの事情で燃料の供給が滞った場合などのために、組合などで長期にわたっ

¹² 植栽後何年で植え替えるのが最も効率的であるかということに関する文献資料は無い。植栽後 20 年以上を経ても萌芽枝の収穫を行なえるというのが関係者の一般的な見解である。25 年以上の萌芽枝の収穫が報告されている論文(Wise & Cacho 2005)もある。発電設備の寿命も 10 年程度であり、樹木の植え替え間隔についてはパイロットプロジェクトの運営実績(単位収量の増減)をモニタリングしながら、検討していくべき課題と考える。

¹³ MP として全国レベルでの価格設定の目安として\$20/tを想定した。チップ用材の販売価格は\$15-23/t(森林局への聞き取り調査結果)。これは形状やサイズに制限があり、燃料用材と比較すると高級材となる。燃料材の市場価格は、サイズ、販売単位、販売地の位置によって大きく差があり、およそ\$10-40/tの範囲であろう。アンロンタメイ村の近郊で調査した結果は\$18-31/tであった。発電所が購入している *Leucaena* の小径木の燃料材としての市場価格は\$12-15 程度であろう。CEC は組合員から\$20 で購入しており、市場価格よりやや高めといえる。高めの価格設定は組合員の植林の奨励につながり、また、裨益者も組合員自身であるので問題とならない。インドでも燃料材の購入価格は\$20/t前後であった。

実際の購入価格は、個々の CEC がそれぞれの事情に合わせて決定すればよい。植林希望者の多いところでは\$15 とし、植林希望者の少ないところでは\$25 として、燃料の安定供給をはかってもよい。いずれにせよ燃料代に関してはコミュニティーベースでは無料となるので、需要と供給のバランスの取れる範囲で価格設定を行なえばよい。

¹⁴ 収穫サイクルは数年と仮定。もっと長期でも短期でも可。燃料材として的高密度植林の場合には、植林と伐採が必要な作業である。場合によっては初年度に 1-2 回の下草刈りが必要となるかもしれない。

て管理運営する場合などに適している。用材などとしての市場価値が高い樹種を選んで植栽しておけば、燃料不足などの事態が起こらなかった場合は、用材等として出荷すればよい。チークがよく植栽されているが、*Leucaena* を混植することによって、チークの生長が促進されたと言う例も報告されている (Kumar et al. 1998)。混植し、チークがある程度のサイズになるまでは *Leucaena* を燃料用として出荷し、植林後早い時期からの収入を確保すると共に、下草狩りなどの手間を省くといった方法も考えられよう。また、栽培地が発電所から遠い場合、(2)の方法で、ある程度樹木を大きくしてから伐採したほうが、運搬効率が上がると思われる。

(3) 季節的冠水地

カンボジアでは雨期中、季節的に水没する(年間 3 ヶ月程度)地域が広がっている。これらの土地は稲作に利用される場合が多いが、利用されていない場合も多い。これらの土地にも特定の樹木が生育しており(表 5)、それらの樹種の殆どが萌芽更新の特徴を持ち、人々は薪炭材として利用している。住民によると幾つかの樹種は非常に早い成長を示し、植林も容易であるという。これらの樹種を未利用の季節的に冠水する土地に植栽してバイオマス燃料の生産を行なうことも考えられる。住民への聞き取り調査の結果 *Barringtonia acutangula* (サガリバナ科)と *Combretum quadrangulare* (シクンシ科)が特に有望であることが解った。。その他のポテンシャル樹種は Table AP-C.1.5 に記す。

Table AP-C.3.1 季節的に冠水する土地に生育する樹種

Scientific name	Family	Khmer Name
<i>Barringtonia acutangula</i>	サガリバナ科	Reang
<i>Peltophorum dasyrrhachis</i>	マメ科	Trase:k
<i>Combretum quadrangulare</i>	シクンシ科	Sangkae
<i>Combretum trifoliatum</i>	シクンシ科	Trahs
<i>Hymenocardia wallichii</i>	トウダイグサ科	Phnom Phnaeng
<i>Pithecellobium dulce</i>	マメ科	Ampil tuk
<i>Zizyphus mauritiana</i>	クロウメモドキ科	Putrie
<i>Gmelina asiatica</i>	クマツヅラ科	Anncha:nh

3.5 苗木の供給

苗畑を CEC が管理して、苗木を組合員に供給するような形が望まれる。*Leucaena leucocephala* や *Gliricidia sepium* などはスタンプ苗 (20-25cm に切り詰めた裸根苗) に適するとされ、この方法が最も簡便であり、勧められる。アンロンタメイ電化組合はこの方法で *Leucaena leucocephala* の苗木の生産を行い、植栽後の活着率も高そうであった。スタンプ苗に適さない樹種に関してはビニールポットを利用したポット苗の生産を行なうことになる。森林局は各地の苗畑でこの方法で様々な樹種の苗木の生産を行なっている。種子はアンロンタメイ電化組合の場合当初オー

オーストラリアから種子を購入したが、その後は植栽樹木から種子を集めて利用している。バイオマス燃料用樹木はその形状にこだわらないし、成長量についても多少の違いに神経質になる必要もない。*Leucaena* や *Gliricidia* に関しては適当な量の種子を信頼置ける機関から購入した後は、植栽樹木から種子を集める方法で広めていけば充分であろう。バイオマス発電の導入が広がりを見せ始めたら、農業省による育種事業などを通して、有料種子の販売を行なう機関の設置が望まれる。

3.6 生態的持続性

Gliricidia sepium や *Leucaena leucocephala* などの窒素固定樹種の場合、落葉などによる還元のため、植林後の土壌中窒素分の増加が多く報告されている (Parrotta 1999, Isaac et al.2003 他多数)。ただし短期サイクルで、枝葉をすべて収穫してしまう場合は、還元分が極端に少なくなるので、窒素においても減少がおころう。一般に葉は木質部と比べ高い養分濃度を持つので、収穫の際林地に残すことで、養分の収奪をかなり和らげることができる¹⁵。樹皮も高い養分濃度を持つ(特にカルシウム)ので、できれば林地に残したいが、直径 10cm 未満の小径木の場合、手間がかかりすぎて難しいと思われる。いずれにせよ、短期サイクルでの収穫を繰り返す場合、養分の欠乏が起こりうる。特にリンとカリウムに関しては適当な施肥を施すことが持続的な生産には必要となるかもしれない。年間 10t/ha 程度の収穫を行なう場合には土壌養分の欠乏はたいてい問題にならないと思われるが、植林地における養分循環の収支や必要とされる施肥量に関する調査は今後行なっていく必要がある¹⁶。

¹⁵ 木材の収穫の際、運搬上の効率から普通枝葉は林地で落とす。*Leucaena* や *Gliricidia* の燃料材収穫の場合、その葉が家畜の飼料に適していることから、葉の利用も考えられるため、樹木の全利用の際に留意することが必要である。

¹⁶ 植物の生育にもっとも重要な N については、空中窒素固定能力を持つ樹種の導入により、持続可能な循環を図る。P と K は次に重要な養分である。植物体に含まれる P と K は土壌から吸収したものであり、その還元となるリター(くず)の分解を除くと、土壌中の P、K のインプットは基本的に雨水中に含まれるものと岩石からの溶脱によるもののみである。これらの総合的な養分循環収支と林業経営に関する研究は先進国においても少ない。発表された研究成果においては伐採に伴う養分の持ち出しはインプットよりも大きく、収支がマイナスとなっている場合が殆どであるが、実際に土壌養分には変化が現れない場合が多い(これも時系列を追った研究は極めて稀)。この原因は、土壌中の養分が植物体中の養分と比較して圧倒的に多いことや、樹木が地下水養分などを吸収して、それをリターとして土壌に還元する場合もあり、単純ではないことである。それらの流れについては、原子同位体などを用いて明らかにする研究も行なわれているが、それぞれの林地によって状況は異なり、ひとくくりにはできない。植林地において実際に土壌劣化が起こっている際の主な原因は、伐採時の重機の利用による侵食やその後の火入れなどが主な原因となっている。したがってヘクタール当たり年に 10トンくらいの収穫であれば、土壌の N 値は増加し、P 及び K については変化が無いであろうことが予想される。一方、グラスランド(草地)などの未利用地では、熱帯の環境下、有機物の分解は早く進み、土壌中岩石の溶脱も速い。このようにして分解された養分は殆どが土壌水として流亡してしまう。また地表流として表層土壌の侵食も進み、有機物のインプットも少ないので土壌の劣化は進む一方である。ここに窒素固定樹木を植栽することにより、土壌中窒素の増加はもとより、土壌水として流亡していた養分を樹木内に蓄え、リターとして緩やかに還元することができる。リターや根の生え変わりにより土壌中の有機物は増加し、土壌の保水力が高まり、生物活動が活発化し生態系の回復が行なわれ、表層土壌の侵食も減少する。樹木植栽によるこれらの利点に注目すべきである。土壌有機物が増加している以上、仮に土壌養分の減少が起こったとしても、それは肥料で還元してやればよいことで、い

一方、アグロフォレストリーとしてこれらの樹木を植栽する場合、固定した空中窒素を畑地に還元したり、土壌中の有機物の増加による、土壌の通気性や水分保持力の増加などにより、農作物に良い影響をもたらす。また植林は土壌の侵食などを防止し、水源涵養機能を持ち流域の水位の安定に資する。

4. ガス化発電機材

4.1 ガス化とは？

ガス化とは一般に固形バイオマスを熱分解及び化学反応を用いて、可燃性の生成ガス（producer gas）に変換することである。ガス化技術開発の歴史は古く、18世紀には木材からガスを発生させる方法に関する研究が行なわれ、1881年にはヨーロッパにおいて、生成ガスによってエンジンの稼動が成功している。ガス化技術が最も広く利用されたのは第二次世界大戦中で、戦争による石油資源の供給不足から、ヨーロッパにおいてはおよそ100万台のガス化炉が自動車、鉄道、船舶の動力源や発電用に利用された。日本やロシアにおいても10万台程度のガス化炉自動車利用されていた。戦後簡便な石油製品が安く市場に出回るようになり、ガス化技術は利用されなくなった。1973年のオイルショックを機にガス化技術は再び注目を集めはじめ、近年では地球温暖化対策として、バイオマスがカーボンニュートラルな再生可能エネルギーとしてその重要性が認識されるに伴い、急速にその技術開発と利用が進みつつある。

4.2 ガス化炉の種類

ガス化炉には大きく分けて、固定床式と流動床式とがあり、固定床式には、下方から燃焼し、上部からガスを送り出すアップドラフト式と、中間部分で燃焼させ下部からガスを送り出すダウンドラフト式とに分かれる。アップドラフト型は最も単純な仕組みであり、水分含有量の高いバイオマス（<60%）にも対応できる特徴があるが、発生ガス中のタールの含有量が多く、オープンなどで燃焼利用する場合にはさして問題ないが、エンジンに接続して利用するには、特別なタール除去装置が必要となる。これに対してダウンドラフト型はタールの発生量は少なく（<100mg/Nm³）、エンジンへ接続しての利用に最も適している。ただし、利用するバイオマス燃料は前もって乾燥させ（<20%含水率）、投入燃料のサイズをある程度一定にする（4-10cm）などの制約がある。またダウンドラフト型は大型化には向かず、一般に～500kWe程度が限界とされている。流動床型は、砂などを流動式の床面として利用する方法で、固定床型の問題を幾つか解決するために開発された。含水率の高いバイオマスにも対応し、タールの発生量もアップドラフト型よりは少なく、大型化にも適している。ただしシステムが複雑でコスト高になり、また操作も複雑となる。ガス化炉の様式の違いとその特徴については Table AP-C.4.1 においてまとめている。カンボジアの地方電化に利用するためには、安価で操作が簡単かつタールの発生量が最も少ないダウンドラフト型が適していると考えられる。小型の発電用ガス化炉の殆どはダウンド

れにせよグラスランドなどの状態よりは良い。またアグロフォレストリーとしての利用の場合、土壌の深い部分の養分を樹木中に固定し、落葉などのリターとして表層土に還元し、作物栽培によって減少した土壌養分を補う役目も果たす。

ラフト型であり、その構造については 4.3 節に詳述する。

Table AP-C.4.1 ガス化炉の代表的な型式の特徴の比較

	固定床型		流動床型
	アップドラフト型	ダウンドラフト型	
未乾燥燃料の利用 (含水率 25-50%)	可	不可	可
燃料サイズの均等化の 必要性	中	大	小
タール発生量	大	小	中
小型 (<100kWe) 発電 用製品	△	○	×

4.3 ダウンドラフト型

ダウンドラフト型では、バイオマスは上部から投入され、乾燥層、熱分解層、酸化層、還元層を経て生成ガスは下方部から送り出される(図 1)。ダウンドラフト型の殆どは図のような V 字型の「喉」を有し、この細くなった部分が酸化層となっており、空気はパイプなどを通して直接この酸化層に送り込まれる。熱分解層で発生したガスはすべて 1000℃以上になるこの還元層を通過するため、殆どのタールはここで分解されてしまう。これがダウンドラフト型でタールの発生が最小限に抑えられる理由である。ただし、容量を大きくしていくと、酸化層内の温度を一定に保つことが難しくなり、その結果タールの発生量が多くなってしまう。このため、ダウンドラフト型は現在のところ 500kWe 程度が限界と考えられている。ダウンドラフト型ではバイオマス燃料が詰まらずに下方に移動していくことが必要であることからあまり大きなサイズのバイオマスを投入することはできない、また炉内をガスが移動するのに十分なスペースが必要であることから、粉末状の燃料の利用にも適さないため、燃料のサイズをある程度整える必要がある。

ダウンドラフト型ガス化炉で発生するガスには可燃性の H₂と CO がそれぞれ 20%弱程度、CH₄ が数%含まれる他、CO₂、N₂ などが含まれる。発生するガスは発電利用の場合で、バイオマス燃料の持つエネルギーの 70%以上を包含する。

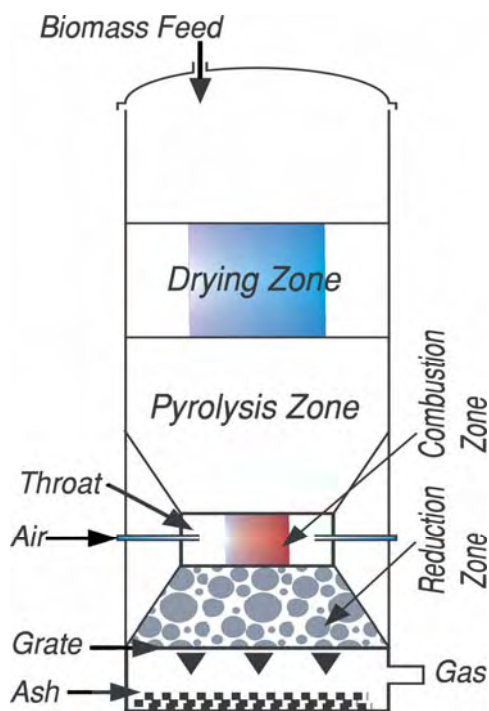


Figure AP-C.4.1 ダウンドラフト型ガス化炉の概念図 (出典： Ankur 社)

4.4 生成ガスによる発電

バイオマスのガス化によって発生したガスは、冷却され、幾種類かのフィルターを通り、タール分や、その他の異物を取り除いた後、エンジンに送られ、エンジンを駆動させる(図 2)。ディーゼルエンジンは僅かな改良を施すことにより、デュアルフュエル(生成ガス 70%、ディーゼル 30%)として、あるいはスパークプラグを取り付け、ガスを着火させることで生成ガスのみによる駆動が可能となる¹⁷。

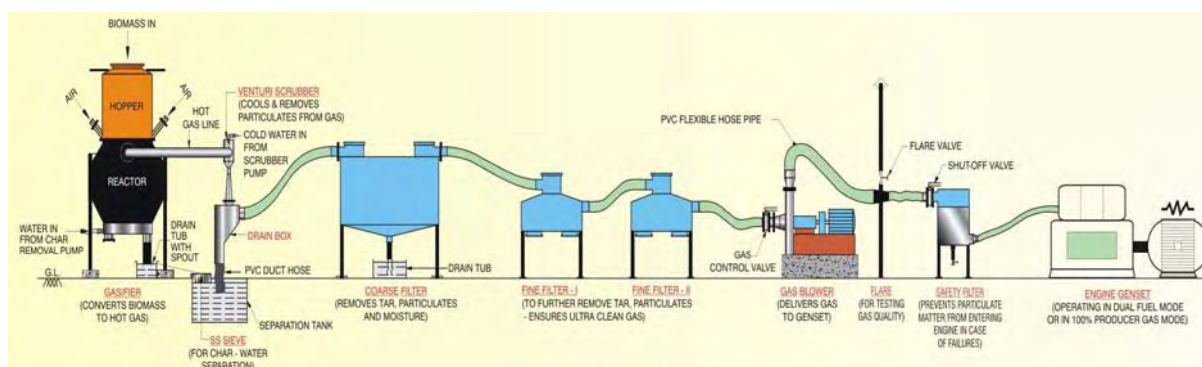


Figure AP-C.4.2 生成ガスがエンジンに送り込まれるまでの流れ (出典： Ankur 社)

¹⁷ この他に必要な機器としては、起動のためのバッテリー、ガス化炉から強制吸気するためのブロアーが上げられる。

4.5 アジアにおける普及状況

先進国では、ヨーロッパを中心に、主として MW 超級のガス化発電システムの導入が進められており、ドイツでは 75MWe のプラントも稼働している。しかし、小型のバイオマスガス化発電機が商品として出回り、地方電化などに利用されているのはむしろアジア諸国である。

第 2 次大戦中、日本を始めアジア各国で利用されていたガス化技術は、一旦忘れ去られた後、1973 年のオイルショックで再び注目され、インド、中国、タイ、フィリピンなどで開発と導入が進められた。その後、原油価格の落ち着きと共にフィリピンとタイでは開発が滞ったが、インドと中国では開発が継続され、普及が進んでいる。インドでは 2003 年までに 55MWe のガス化発電が導入された。2004-05 の 2 年間にインドの A 社のみで 20 MWe の供給を行なっているもので、現在では大幅に増加しているものと思われる。中国では、熱利用を中心としてガス化技術の開発が進められてきたが、現在 100 台程度の籾殻を燃料としたガス化発電機が稼働している (Bhattacharya 2005)。

4.6 安全性と環境影響

(1) 一酸化炭素¹⁸

- バイオマスの小型ダウンドラフト型ガス化炉による生成ガス中には、20%程度の CO が含まれている。
- ガス化炉の設計圧を大気圧(ブローヤやエンジンで吸引するため実際には多少の負圧)とすることにより、CO を含む生成ガスのガス管路からの漏出を防止することができる。(ただしこの負圧は、管路にクラックが生じた場合には、逆に空気を管内に吸引することになり、ガスの燃焼/爆発を引きおこす可能性を生ずる。爆発が生じた場合の過剰圧力を、炉上部のスプリング蓋や下部の水シールなどにより開放する安全装置が考案されている。)
- 竣工時にガス漏れ試験を実施する。
- 燃え残りの CO がエンジンから排出される。ガス化発電の排出基準として酸素濃度 5%の下で 2,000 mg/m³ が現実的かつ適切な数値として、示唆されている(p.297, Handbook, Biomass Gasification, Gasnet, 2005)。
- エンジンは室外に設置することが望ましい。アジアのガス化発電所の多くでは、屋根と一部の側壁だけの発電所構造とすることにより、十分な換気を確保している。
- ガス検知・警報器を所内に設置するか、携帯型警報器をオペレータに持たせる。
- 始動時、停止時により多くの CO が漏出する可能性があるため、換気が特に重要。

(2) タールとフェノール

ガス化炉で発生するタールとそれに含まれるフェノールは、次のような毒性をもっているため、

¹⁸ Handbooks of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. T.B. Reed. The Biomass Energy Foundation Press などの文献情報

慎重な対策が必要である。

- ある種のタールは発ガン性を持つとされている。(一般的に薪の燃焼時に発生する煙は白内障の原因になると言われている。ただし、ガス化炉ではそのような煙は発生しない。)
- タールはフェノールを含む。フェノールは石炭酸とも言われ、特異臭のある無色の水溶性の結晶である。日本の排水基準では 5mg/L。フェノールは、哺乳類に対して中等度の急性毒性をもつ。フェノールの毒性は、淡水生物類に対してより高いとされる。
- 小型ガス化炉の凝縮液(condensate)のフェノール濃度は 1,500-3,000 mg とされる。これを地面や川に排出することは避けなければならない。
- 最良の対策は、タールの生成を最小化することである。その点で、小型ガス化炉では、タール生成量が最も少ないダウンドラフト炉が適している。生成ガス中に残留するタールをオガクズ・フィルターなどで除去し、使用済みオガクズをガス化炉で燃焼させる対策もある。水フィルター方式の場合には、エンジン排熱を利用してタール分を分離・乾燥させ、バイオマス燃料と一緒に炉内でガス化させる対策もある。また、使用する燃料を十分に乾燥させることにより、凝縮液の排出を最小化させることができる。
- 本 MP が提案するパイロットを実施する際に、これらの対策を実施して、受容できる環境排出基準以内での廃水の最終処理策を検証することが必要である。

(3) 火災

- 燃料補給のためにガス化炉の上蓋を開ける際、内部に充満していたガスが空気に触れて燃焼し、周辺の可燃物に引火する可能性がある。
- 可燃ガスが、ガス化炉とエンジンの運転停止後も炉と管路内に滞留する。炉の再点火の際に、この残留ガスが引火・爆発する可能性がある。
- このような火災を避けるために、以下の対策をとることができる。
 - ✓ ガス化炉の点火前に、管内の残留ガスをブローアで排出し、管内を新鮮空気で満たす。
 - ✓ 点火時には、点火口の正面ではなく脇に立ち、点火口から炉内を覗かない。
 - ✓ ガス化炉の上蓋が固定式の場合は、安全弁を設置する。
 - ✓ 生成ガスと空気の混合器に火炎遮断機(flame arrestor)を設置する。

(4) 環境ハザード

- バイオマスによる発電に適する村落は全国に 6328 あり、これらの村落の電力を賄うのに必要な木質バイオマスの必要量は年間 186,000 トン。これは 5200 万トンと推計される全国の森林の年間バイオマス成長量の僅か 0.4% であり(パート 2、1.4.4 参照)、発電用バイオマスをすべて森林から調達しても、森林の持続的な成長に与える影響はわずかである。ただし発電所周辺などで局所的に過伐のため、森林の劣化が起こる恐れがあるので、燃料供給は原則として栽培型とする。

- 栽培方式の場合でも、過剰な生産・収穫は、土壌中の栄養分を消費するだけでなく、土壌の透水性と保水能力を低下させる可能性がある¹⁹。本 MP では土壌空気中の窒素固定能力を持つ樹種を栽培樹種候補に加え、さらに計画生産量を 10 t/ha/yr と安全サイドで計画している。
- 持続的に栽培・収穫可能なバイオマス生産量については、パイロットの実施とモニタリングを通じて、検証していくことが必要である。

4.7 地方電化・給水への適用事例(インド、カンボジア)

(1) インド・ゴサバ島地方電化

インド・西ベンガル州のサンダーバーンズのデルタ地帯には 300 万人が暮らし、そのうちの 200 万人は電気の恩恵を受けていない。デルタ地帯に広がる無数の島々を系統で繋ぐことは経済的に困難であり、独立ミニグリッド電化が計画され、1997 年 6 月に 500 kW (5x100 kW) のデュアル燃料ガス化発電装置 (70%バイオマス+30%ディーゼル) が導入された。ゴサバ島はカルカッタの南西 80km に位置する。陸地側の島に最も近い港から



Figure AP-C.4.3 ゴサバ島エネルギー組合の 5 x 100 kW バイオマスガス化炉

からは船で 1 時間半ほどの行程である。ガス化発電施設の導入当初 16 世帯しか接続を望まなかった。これは人々がガス化発電を信用していなかったためである。実際に給電が開始されると人々は次々に接続を希望し、現在では 1150 世帯に給電を行なっている。現在、1 日 16 時間運転されている (9:00 から翌朝 1:00 まで)。発電所が設置されてから島は急速な発展を遂げた。多数の商店が立ち並び、ゲストハウスも 10 件営業しており、近郊の島々から人々が買い物に訪れるようになった。銀行(State of India Bank)もオープンし、人々の経済活動を支えている。電話やインターネットが利用できるようになり、コンピューターのトレーニングセンターも開設された。病院では簡単な手術が行なえるようになった他、電力は学校にも供給され、街灯、飲料水の供給、灌漑のためのポンプアップにも利用されている。

このプロジェクトは 100%政府の支援によって建設されたが、地元のエネルギー組合が所有し、運営を行なっている。エネルギー組合は 75ha のプランテーションを管理し、燃料木は組合員からの買い上げとプランテーションからの供給で賄っている。ゴサバ島の近郊の島で別の 500 kW のバイオマス発電システムが 2001 年から稼働している。他にも多数の規模が小さいシステ

¹⁹ p. 123, Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems, Second Edition (Fourth printing), T.B. Reed and Agua Das,

ムが西ベンガル州で稼働している。

Table AP-C.4.2 ゴサバ島地方電化の諸元

発電容量	5x100 kWe
接続世帯数	1150 世帯
給電時間	16 時間(9:00-1:00 翌朝)
電気料金	\$0.12(一般) \$0.15(商店) \$0.18(産業: 電話リピーター、病院のレントゲン施設、銀行、NGO の土壌分析機材)
労働者	22 人
燃費	90cc ディーゼル+850-900g木材/kWh
バイオマス燃料代	\$0.78/40kg 半乾燥木材(コンテナ容量) \$19.50/t

(2) バッタンバン州アンロンタメイ村電化組合

カンボジアでは 1 件のバイオマス給電事業が組合方式によって運営されている。バッタンバン州バンナン地区のアンロンタメイ村では 2005 年 2 月からコミュニティーエネルギー組合事業を開始した。現在午後 4 時半から 11 時半までの 7 時間、73 世帯に電気を供給している。本事業は Small and Medium Enterprise Cambodia (SME) という NGO のサポートを受けて運営されている。SME は CIDA (Canadian International Development Agency: カナダ国際開発事業団) から本事業に対して \$24,000 の助成を受け、発電施設の設置と配電を行った²⁰。それらの設備はエネルギー組合の所有となり、初期の試験期間が過ぎ、事業が軌道に乗った後の運営は組合に任せられる。SMEC は事業開始から一定の期間(18-24 ヶ月)アドバイザー的な役割で運営を支援する。

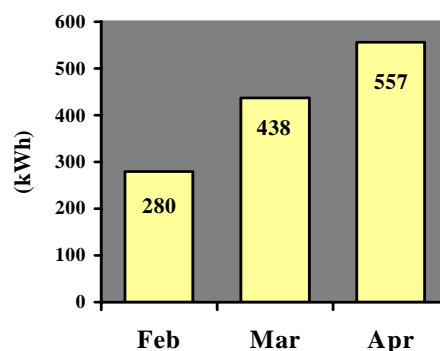


Figure AP-C.4.4 アンロンタメイ村バイオマス発電事業の開始後の電力消費量の推移

²⁰ アンロンタメイ村の事業の一番の課題は、CIDA からの予算額が決まっていたため、導入できる機材の発電容量に制限があり、村内の半分程度の世帯しか電化できない計画しか立てられず、村内に不公平感が残ったことであろう。2005 年9月から、昼間にバッテリー充電事業を始め、これにより設備利用率が上がり、事業の収益が上がるようになったが、料金を下げるのではなく、設備の増設のために剰余金を積み立てている。最近プロジェクトの拡張事業に対して UNDP から予算が付き、村全体の電化を行なえるようになる見通しである。

本事業では9 kWeの木材用ガス化発電装置をインドから輸入した²¹。配電線が建設され、各世帯にはメータが設置され、使用量に応じて料金が徴収される方式がとられた。また街灯も設置された(写真 2)。設備投資の総額は\$19,094 でその内訳は発電所建物(\$1,500)、ガス化装置(\$10,130)、発電機(\$4,342)、送電線(\$7,464)となっている。労働力は組合員によって提供された。

組合員は初期接続料として R50,000 (\$12.50)を支払い、R1,200/kWh (\$0.30)の料金が使用量に応じて請求される。電力使用量は供給開始後毎月増加しており(図 3)、4月の消費量は557kWhで1ヶ月間の世帯の平均電力使用量は7.6 kWhとなり、世帯当たりの平均電気料金はおよそ\$2.30となっている。電気料金には設備の償却費が含まれており、ガス化炉の使用期間は20年、発電機は8年、送電線は30年として計算されている。償却費の発電コストに占める割合は38%となっている。

組合員は *Leucaena leucocephala* というマメ科の樹木を植栽することを奨励され、発電用燃料は *Leucaena* の木材を組合員から\$20/tで購入することですべてまかなわれている。現在、60世帯によって計8haの *Leucaena* 植林地がある。2005年12月の月間電力消費量約1,000 kWhの水準なら、年間に必要な木材の量は18トンで、2ha程度の植林地で燃料の供給をまかなえることになる。

²¹ タール分を含んだガス浄化後の排水は閉鎖系で循環しており、3ヶ月に一度程度、水槽内の上澄み液は土壤に散布し、凝集・沈殿したタール分は乾燥後焼却している。インド国内でもこの方法がとられている。上澄み液の土壤への散布は、有機物であるタールを土中菌により自然分解することを期待するもので、日本でも実績があるとされるが、その詳細は把握していない。この方法の環境に与える影響をまず明らかにする必要があり、今後の課題である。

なお、米国の北ダコタ大学では同製品の排水を出さない方式に改良して実験を行なっている。製品化して米国内での流通を念頭において実験を行なっている。まだ内容の公表にはいたっていないが、実験が終了すれば情報の提供を受けられるだろう。



Figure AP-C.4.5 アンロンタメイ村バイオマス電気組合事業

4.8 バイオマスガス化発電装置・製品比較

バイオマスガス化発電システムの製造会社について表 7 に、それぞれの発電システムのスペックについては表 8 に取りまとめた。カンボジア地方電化向けの製品として、小型の(<100kWe)システムを製造販売しているか、デモ機が稼動し、商品としての販売が近い将来行なわれる段階にある製造元についてのみリストアップした。マスタープランでは燃料木の栽培による供給を推奨しているため、ここでは木材を燃料とするシステムについてのみ考察する。

すべての製造元がダウンドラフト型デザインを採用している。ダウンドラフト型はシンプルな形状で、タールの発生量が少なく、小型ガス化発電システムに適している。表8の B 製造元は唯一オーブントップ・ダウンドラフト型を採用している。高温の生成ガスの熱を利用するためガスを乾燥層の周囲を通過させてから送り出している。酸化層は、上部と側方ノズル部の2層あり、これによりタール除去効果を高めている。その結果、炉内の燃焼効率が高まり、含水率の高い(<30%)燃料にも対応できるようになっている。

A 製造元は突出して高い出荷実績を持ち、直近の 4 年間(2002-2005)だけで合計 29.5MWe のガス化発電システムを出荷している。A 製造元は 80 年代からガス化炉製品の製造を行っており、これまで計 12 カ国に多数の発電システムを納入している。主な納入先リストを付表 1 に示す。A 製造元はカンボジアにもすでに2機のガス化発電システムを納入済みで、カンボジア国内に代理店も有している。現在のところ、カンボジアにおいて人々が注文して製品の購入を行なうことができるのは A 製造元のみである。他の製造元は、カンボジアへの導入には、実証試験を含めたデモ的な導入を望んでおり、商品としての輸出はその結果をふまえて検討したい

という立場をとっている。D 製造元の場合価格も安く、カンボジアへの商品の導入も望んでいるが、過去の導入実績について公表しておらず、現段階では製品に対する信用度は低い。B、C、D、E 各製造元の製品の多くは 24 時間長期連続運転、遠隔モニタリング及び操作といった性能を持つ。カンボジアの地方電化の場合、人件費が安いこともあり、これらの性能は不必要であり、むしろその分システム導入時の初期投資コストを下げた方が導入が進む。C 製造元は、カンボジア国内に製造所を設け、地元の材料でニーズに見合った製品の製造について打診してきたが、これには別途予算の措置が必要となり、現状では難しい。ただし、ガス化炉の国内生産についてはその方策について今後も検討すべきであろう。

現状では、価格が安く、実績があり、カンボジアにも代理店を持つ A 製造元の製品が導入に適していると考えられる。プレフィジビリティ調査における経済分析などは、A 製造元の製品の導入を仮定して行っている。



Figure AP-C.4.6 A 製造元の 40kW バイオマスガス化発電システム

Table AP-C.4.3 ガス化発電システム製造元の比較

製造元	国	ガス化炉の タイプ	容量	価格	導入実績	その他
A	インド	ダウンドラフト	4 - 850 kWe	\$900 -\$2,000/kWe	29.5 MWe (2002-2005) 2002 年以前は正確な記録無し。 アジア、アフリカ、南北両アメリカ、オセアニア の 12 カ国への導入実績。カンボジアにも 2 台 の導入実績がある。	カンボジアに代理店を持つ。 アメリカの北ダコタ大学が 300 kWe のガス化炉 を導入して実証試験中(2005)
B	インド	オープン トップ ダウンドラフト	20 - 500 kWe	\$1,000/kWe	インド、チリ、スイスの 3 カ国に 23 システム、 3.3MWe の導入実績。	製品の生産ライセンスをインドの 3 社、スイスと 日本の各一社が持つ。
C	ニュー ジ ーランド	ダウンドラフト	15 - 550 kWe	n.a.	最新型のシステムがアイルランドとカナダで導 入されている。	製品の製造ライセンスを持つ会社がアイルランド にもある。技術コンサルタントも行い、カンボジ アの場合は現地生産を提案。
D	ニュー ジ ーランド	ダウンドラフト	50 kWe- 3 MWe	\$1,000/kWe	公表していない。	
E	米国	ダウンドラフト	5 - 50 kWe	\$3,000 - \$5,000/kWe	米国とフィリピンに 10 システムの導入実績。	バッテリーバンクを利用した 24 時間連続運 転。遠隔監視及び操作。

Table AP-C.4.4 地方電化の候補製品の仕様比較

各製造元の発表情報に基づいて作成。 *n.a.*; not available

	A	B	C	D	E
発電容量	64 kWe	80 kWe	34 kWe	100 kWe	50 kWe
エンジン形式	100%生成ガス、スパーク着火システム	100%生成ガス、スパーク着火システム	100%生成ガス、スパーク着火システム	100%生成ガス、スパーク着火システム	スタートアップ及びバックアップ用として LPG を使用
運転	マニュアル運転・燃料投入	自動運転	自動運転・遠隔操作	自動運転・遠隔操作	自動運転・遠隔操作
木材燃費	1.5 kg/kWh	1.2 kg/kWh	1.3 kg/kWh	1.5 kg/kWh	1.5 kg/kWh
連続運転	> 24hr	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	24hr/7days	24hr/7days
ガス化効率	> 75%	80-83%	71%	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>
ガス化炉耐用年数	10年	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>	30年	<i>n.a.</i>

4.9 ライセンス生産、合弁生産

バイオマスガス化によるエンジンの駆動が第2次世界大戦中には広く普及していたことから解るように、ガス化炉の製造はそれほど複雑な技術ではない。カンボジアにおいても、バタンバン州の REE 業者がインドからアンロンタメイ村に導入されたガス化炉を見よう見まねで複製し、生成ガス 70%、ディーゼル 30%で 75kW のディーゼルエンジンを駆動させ、410 世帯へと電力の供給を行っており、国内生産は可能と考える。上記以外にもガス化炉を開発中の REE 業者がおり、ディーゼル価格が高騰する中、自然とバイオマスを利用しようとする動きが起りつつある。ただし、このような見よう見まねで複製されたガス化炉が広く国内で普及することは、インド A 製造元の特許を著しく侵害することになる可能性が高い。また、安全基準や環境基準に配慮していないため、ガス中毒、火災、環境汚染などを引き起こす可能性が高く、対策が必要となる。ただし、単に取り締まるのではなく、カンボジア国内での独自のガス化炉製作を支援していく仕組みや品質保証制度の導入と共に、当面はインドなどの商品のライセンス生産を国内で行っていく必要がある。ガス化発電を本格的に普及させるには、国内において迅速にパーツの取り寄せや、保守サービスを受けられるようになることが必要である。ガス化炉の国内生産を実現することで、価格を飛躍的に低減させることが期待できると同時に、これらのサービス体制が自然と充実してこよう。

参考文献

- Bhattacharya SC. 2005. Biomass gasification in Asia. In: Handbook biomass gasification. Gasnet. Netherlands. pp.162-180.
- Goldemberg J. World energy assessment. 2000. New York: UNDP, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council; p. 508.
- Greenpeace. 1993. Towards a fossil free energy future: The next energy transition, A technical analysis for Greenpeace International by the Stockholm Environment Institute Boston Centre, Boston.
- Hoogwijk M, Faaij A, Eickhout B, de Vries B and Turkenburg W. 2005. Potential of biomass energy out to 2100IPCC. 1996. Climate Change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analysis, Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group II report, Cambridge University Press, Cambridge.
- Isaac L, Wood CW and Shannon DA. 2003. Pruning management effects on soil carbon and nitrogen in contour-hedgerow cropping with *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit on sloping land in Haiti. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65. 253-263.
- Kumar BM, Kumar SS and Fisher RF. 1998. Intercropping teak with *Leucaena* increases tree growth and modifies soil characteristics. *Agroforestry Systems*, 42, 81-89.
- Parrotta JA. 1999. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantation of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 124, 45-77.
- Shell. 1996. The evolution of the world's energy system. Shell International Ltd. Group External Affairs, Shell Centre, London., for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy*, 29, 225-257.

Table AP-C.4.5 インド A 製造元ガス化発電システムの主な導入先リスト

Dual Fuel Mode:

Client	Size	Gross output (kW) of system
Forestry Tasmania, Australia	WBG-40	40
Flex Technologies, Russia	WBG-500	500
Bionexx, Madagascar	WBG-40	40
Mozambique Leaf Tobacco, Mozambique	WBG-80	80
M/s Shree Gopal Rice Mill, West Bengal	FBG-120	120
M/s Durgesh Rice Mill, West Bengal	COMBO-175	175
SA Plywood Industries, West Bengal	WBG-400	400
APEDA, Arunachal Pradesh	5 X WBG-100	500
Agrocel Industries, Gujarat	WBG-300	300

100% Producer Gas Mode:

Client	Size	Gross output (kW) of system
James Finlay (Uganda) Ltd Muzizi, Uganda	WBG-400/ GAS-250	250
Dr.Ray Wijewardene, Sri Lanka	WBG-10/ GAS-4	4
CAEMA Srl, Italy	WBG-15/ GAS-9	9
Small and Medium Enterprise Cambodia, Cambodia Installed at Community Energy Cooperative, Cambodia	WBG-15/ GAS-9	9
Lanka Transformers Ltd., Sri Lanka	WBG-80/ GAS-40	40
Meghaplast, Meghalaya	WBG-400/ GAS-250	250
KREDL, Karnataka	WBG-400/ GAS-250	250
Agrocel Industries, Gujarat	WBG-300/ GAS-180	180
PMC, Tamil Nadu	WBG-400/ GAS-200	200
Muni Seva Ashram	WBG-80/ GAS-40	40

60 GAS-9 + GAS-4 Systems sent to Tamil Nadu for rural electrification.

5. BIOMASS GASIFIER POWER GENERATION SYSTEM

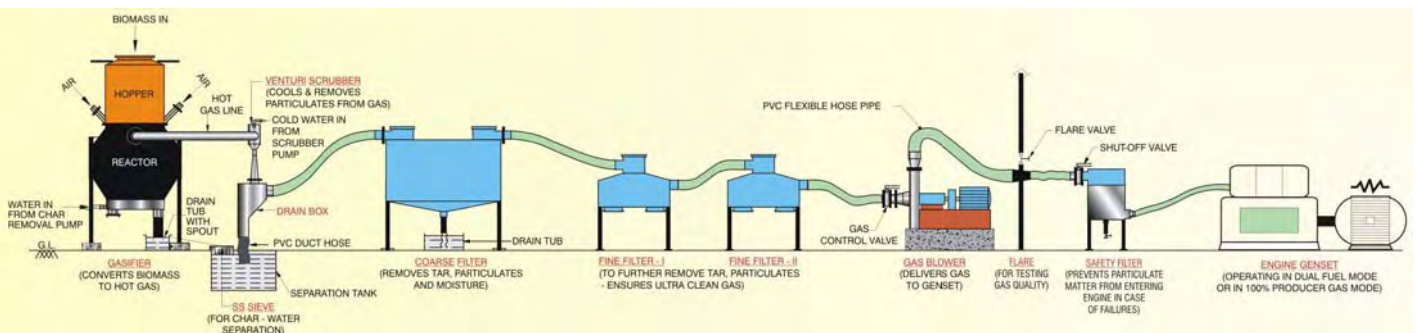


Figure AP-C.5.1 Biomass Gasifier Power Generation System

Source: Ankur Scientific Energy Technologies Pvt. Ltd.

6. REPORT OF PRODUCTIVITY AND SUSTAINABILITY OF BIOMASS FUEL PRODUCTION

Productivity and sustainability of biomass fuel production

—Case study of Meanok Forest Plantation in Kampong Chhnang Province and Anlong Ta Mei Community Energy Cooperative in Battambang Province —



Meanok Forest Plantation



Anlong Ta Mei Tree Farm

Hitofumi Abe	JICA study team for ‘The Master Plan Study on Rural Electrification by Renewable Energy in The Kingdom of Cambodia’
Phon Pheach	Ministry of Industry, Mines and Energy
Uon Sam Ol	Forest Administration
Miech Phalla	Centre for Livestock and Agriculture Development

April 2006

ACKNOWLEDGEMENT

This study was conducted as a part of ‘The Master Plan Study on Rural Electrification by Renewable Energy in The Kingdom of Cambodia’ and fully funded by Japan International Cooperation Agency (JICA).

The authors and JICA Study Team would like to thank to Forest Administration for giving permission to us to work in Hun Sen Meanok Forest Plantation and provide support for our study. We especially thank to Mr. Ma Sok Tha, Chief of Reforestation Office, who organised logistical support and provided plantation information. Messrs. Toshihiro Shima and Yuzuru Kimura, advisors of Forest Administration, provided us valuable field data and information of Meanok Plantation. We also thank to Messrs. Kazuhiro Goseki and Kozo Yamashita who are Chief Advisor and technical expert of JICA ‘Capacity Building for the Forestry Sector in the Kingdom of Cambodia’ project for letting us use their various field research equipments.

For the work in Anlong Ta Mei, we would like to thank to SME Cambodia for permitting us to work in their project site and provided necessary support. Messrs Leuk Dana, Sam Bona and Erik Middelenk of SME Cambodia directly or indirectly provided valuable help for our study. People in Meanok and Anlong Ta Mei welcomed us and provided labours.

Chemical analysis was conducted under supervision of Dr Nakorn Worasuwanarak in a laboratory of King Mongkut’s University of Technology in Thailand. Ms Ung Chan Pisey provided valuable support in logistics and lab analysis.

INTRODUCTION

In Cambodia, about 15% of households have access to electricity (NIS 1999). However, only 9% of households in rural area have access to electricity compared to 54% in urban areas. Cambodia does not have a major inter city main grid connection. Moreover, electricity tariff in rural area is generally much higher, sometimes it exceeds 10 fold differences. Overall, people in rural areas are subject to both expensive and poor quality electricity.

The Royal Government of Cambodia is acutely aware of how rural communities are disadvantaged and have set the target of 70% level of household electrification with grid quality electricity by the year 2030 (JICA 2005a). The government will be working to achieve this target via grid extension and mini-grids establishments and it has been proposed that mini-grid establishment will be based mainly on renewable energy. All oil products are imported in to Cambodia. Consequently, utilization of domestic renewable energy source has both environmental and economic advantages. However, micro-hydro and wind power potential is very limited in Cambodia and solar power generation is not appropriate for stand alone grid systems (JICA 2005a). By contrast, biomass resources such as wood and agricultural residues are abundant in Cambodia and biomass fuel already accounts for some 85% of the national energy consumption (MOE 2002).

In Cambodia, biomass gasification electricity is estimated cheaper than diesel generation when electricity consumption per household exceeds 13 kWh/month. Average electricity consumption per household in rural community is about 10 kWh/month when people use electricity only for lighting and watching TV. With additional daytime electricity use such as water pumping for household and irrigation purpose, rice milling and ice making makes biomass gasification electricity cheaper option than diesel generation. JICA study team for 'The Master Plan Study on Rural Electrification by Renewable Energy in The Kingdom of Cambodia' concluded that over 6000 villages among total 14,000 villages in the country are appropriate candidature for biomass electrification in terms of both economics and biomass resources (JICA 2005a). JICA study team also concluded that tree planting would be the main biomass resource rather than agricultural residues such as rice husk mainly because the difficulty of stable supply.

For the success of biomass electricity systems, sustainability of fuel wood production is one of the most important factors. If sustainable management is to be achieved, management programs need to develop a better understanding of the biological and ecological processes that maintain net primary production and biomass storage (Kimmins 1997), in order to maintain production and minimise nutrient depletion of sites over successive rotations. The history of tree planting is rather short in Cambodia. With the best knowledge of authors, there is no published data of biomass production and nutrient cycling of tree plantation in Cambodia. Biomass estimation of forest stand is important not only for biomass energy use but also for stored carbon estimation as the greenhouse gas sink. JICA study team decided to conduct study of biomass productivity and nutrient sustainability of tree plantation. Although the resources and time we can allocate for such study was very limited as a study team for national rural electrification. We could manage to conduct field sampling survey in both tree farming

and tree plantation site as well as chemical analysis of plant materials and soils. In this report, we present biomass equation and productivity of *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia auriculiformis* in Meanok Forest Plantation in Kampong Chhnang Province and *Leucaena leucocephala* in tree farming in Anlong Ta Mei Energy Cooperative in Battambang Province. We also present nitrogen and carbon distribution in trees and soils, and provide suggestions and recommendations for the plantation management and further investigations.

Part 1. Meanok Forest Plantation

BACKGROUND

Environment and history of Meanok Forest Plantation is well described in Lic and Shima (2005). We summarize it as follows. Meanok Forest Plantation is located in Sameakki Mean Chey District, Kampong Chhnang Province. The plantation spread at latitude between 11° 50' and 11° 57', and longitude between 104° 30' and 104° 40'. The plantation is owned and managed by Forest Administration. Planting started in 1999 and total 1525 ha have been planted by 2003. Planted species are *Acacia* spp. and *Eucalyptus* spp. Degraded natural forest is cut and bulldozed prior to planting. Average annual rainfall recorded at Pochentong Meteorological Station in Phnom Penh which is about 40 km away from the plantation is 1550 mm. The average temperature in plantation is 27.3°C. Soil type of the area is classified as Ferric Acrisols or Gleyic Acrisols (FAO 1974).

There are several species of *Eucalyptus* and *Acacia* have been planted in Meanok Plantation. We selected *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia auriculiformis* for this study. *Eucalyptus camaldulensis* is a major *Eucalyptus* species in Meanok Plantation and some tree growth data is published in Lic and Shima (2005). Although no published growth data of *Acacia* is available, once biomass equation is built, stand biomass can be easily estimated after forest census data is collected. *Acacia auriculiformis* has the oldest stand. Consequently variety of dbh (diameter at breast height) trees is available for sampling. We report volume and biomass equation, carbon and nitrogen concentration of each biomass components of *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia auriculiformis*, stored biomass, carbon and nitrogen content in each biomass components of *E.camaldulensis* stand. Description and, carbon and nitrogen concentration in a soil profile are also reported.

METHOD

Biomass Estimation

We harvested 10 trees each of the species across the range of dbh distribution (4.4 – 20.2 cm). Trees were felled and the stumps cut to ground level. Total tree height and diameter at 2 m intervals, both under and over bark, were recorded along the length of the stem. Stem sections were then weighed both with and without bark. Crown components were sorted and weighed as: branches diameter ≥ 2 cm, < 2 cm and foliage. Sub samples of each component and four sub samples of stems were also weighed fresh and then brought to the Ministry of Industry, Mines and Energy (MIME) in Phnom Penh where they were dried in an oven at 70°C until constant weight. The moisture content was used for estimating total dry weight of each tree.

Allometric relationships of estimated component dry matter (y) from diameter at breast height (dbh) were developed using the harvested sample trees for each component separately. Linear and non-linear regressions of several forms relating component weights, stem volumes and leaf area to dbh were examined. Allometrics that best fitted the data were chosen by examining

residual distributions and maximizing adjusted r^2 . The final regression form was as \log dry matter = $a + b \log$ dbh, where a and b are constants.

We estimated stand biomass by applying dbh data in Lic and Shima (2005). Among their data in different stands. We only used the 2001 confirmed seed source plot data because one forestry officer pointed out that there would possibly be the confusion of *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus tereticornis* in some other plots.

Leaf areas of sample leaves were measured by leaf area meter to obtain specific leaf area (the area of the leaf as a ratio of its dry weight). Leaf area is calculated as multiply specific leaf area and the dry leaf mass, and then leaf area index (the leaf area per unit land area) was calculated.

Soil Profile

A one-meter depth soil profile was dug and the description was recorded in the *Acacia auriculiformis* stand. Profile description was made according to the standard method of FAO (1990). Soil colour was recorded according to the Standard Soil Color Charts (Research Council for Agriculture, Forestry and Fisheries 1997) Sample soils were collected using soil corers which volume was known. Four samples were collected from each horizon and bulked.



Photo 1. Biomass destructive measurement in Meanok Tree Plantation. (Top left) Stem measurement of *Acacia auriculiformis*. (Top right) Stem weighing of *Eucalyptus camaldulensis*. (Bottom left) Sorting leaves and branches of *E.camaldulensis*. (Bottom right) Studied *E.camaldulensis* stand.

Chemical Analysis

Oven-dried plant samples were then ground using food grinder. Each biomass components of 3-4 trees were bulked to reduce the number of samples for analysis. Soil samples were air-dried and lightly ground using pestles and mortars. The ground plant and soil samples were then sent to King Mongkut's University of Technology in Thailand. At the laboratory, samples were further ground into fine particles of less than 250 µm in diameter, and dried in vacuo at 70°C for 24 hours prior to analysis. Samples were then analysed using a CHNOS analyser (Thermofinnigan, Flash Ea 1112). Soil pH was measured in a 1:2 mixture of soil:deionized water at MIME.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil Profile

Description and a photograph of the one-meter depth soil profile at the *Acacia auriculiformis* stand in Meanok Plantation are shown in Box 1. The profile did not show apparent differences between horizons. Soil textures were sand across the profile. Upper horizons were slightly blackish than sub horizons and this indicates more organic matter contents in upper horizons. Soil colour in A horizon was reddish grey (10R 5/1) then pale reddish orange (2.5YR 7/3) for B1 and light gray (5YR 8/2) for B2 horizons. Some chemical and physical characteristics of the soil profile of Meanok Plantation and Anlong Ta Mei tree farm are shown in Table 1. Soil in Anlong Ta Mei was clayish and very different from the soil in Meanok. Bulk density was higher in Meanok. Higher bulk density is typical characteristics of sandy soil. pH in surface was slightly acidic (5.4 for Meanok and 5.7 for Anlong Ta Mei) and sub soils were closer to neutral (6.3 to 6.9) in both sites. The pH level is in the preferable range (5.5 to 7.0) of most plants growth (Brady and Weil 1999). Soils in Meanok contained very small amount of carbon and nitrogen. Nitrogen concentration in the soil below 70 cm was too small and was not detectable. Total carbon and nitrogen stored in the soils of 1 m depth in Meanok were only 13% (C) and 12% (N) of soil in Anlong Ta Mei. Soil profile survey in Meanok was conducted at *A.auriculiformis* stand. Higher nitrogen concentrated litter fall because of nitrogen fixing characteristics of *A.auriculiformis* likely enrich the nitrogen concentration in surface soil. Nitrogen concentration in the soils in *E.camaldulensis* site would be even lower. Other nutrients are likely to be very limited as well in Meanok soils.

TABLE 1. Physical and chemical characteristics of soil profiles in Meanok *Acacia auriculiformis* plantation and Anlong Ta Mei *Leucaena leucocephala* tree farming site.

Horizon	Depth	Bulk density	pH	N concentration	C concentration	C/N ratio	N stored amount	C
Meanok	(cm)	(Mg/m ³)		(%)	(%)		(kg/ha)	
A	0-12/20	1.57	5.4	0.032	0.41	12.75	798	10175
B1	12/20-70	1.87	6.3	0.007	0.05	6.83	684	4667
B2	70-100	1.87	6.8	0.000	0.03		0	1575
total							1482	16418
Anlong Ta Mei								
A	0-12	1.26	5.7	0.111	1.22	10.97	1686	18492
B	12-40	1.32	6.9	0.121	1.49	12.29	4454	54745
B	40-70	1.35	6.9	0.077	0.73	9.48	3119	29582
C	70-100	1.48	6.8	0.068	0.61	9.03	3017	27239
total							12276	130058

BOX 1. Soil profile description of Meanok Forest Plantation.

Profile # 0502 Meanok *Accacia auriculiformis* plantation, Kampong Chhnang Province.

Coordinates: 104° 35' E, 11° 50' N. Altitude: 30m, Topography: almost flat. Land form: plain. Land element: plain. Position: intermediate part. Gradient: level. Form: straight. Micro-topography: No micro-relief. Parent material: not known. Erosion: no evidence of erosion. Land use: 6 y old first rotation *Acacia auriculiformis* plantation.



Hori zon	Depth (cm)	Color (moist)	Notable features
O	1 - 0		Mostly <i>Acacia</i> leaves.
A	0 - 12/20	10R 5/1	No mottling / sand / no rock fragment / very weak structure / loose consistence when dry or moist / non sticky / non plasticity / 14 (Yamanaka method hardness) / no voids / few very fine and very few fine, medium and coarse roots.
B1	12/20 - 70	2.5YR 7/3	No mottling/ sand / no rock fragments / very weak structure / loose consistence when dry or moist / non sticky / non plasticity / 20.5 (Yamanaka method hardness) / no voids / very few very fine, fine and medium roots.
B2	70 +	5YR 8/2	No mottling/ sand / no rock fragment / very weak structure / loose consistence when dry or moist / non sticky / non plasticity / 22 (Yamanaka method hardness) / very few fine and medium roots.

Biomass and Volume Equations

Tree diameter (over-bark) was a strong predictor of stem volume of trees (Figure 1). Equations for estimating tree volume and biomass of plant components from dbh are shown in Table 2. Stem volume of *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia auriculiformis* can be calculated with following equations.

(*E.camaldulensis*)

$$\log \text{ over-bark stem volume (m}^3\text{)} = 2.375 \times \log \text{ dbh (cm)} - 8.737 \text{ (r}^2 = 0.995\text{)}$$

(*A.auriculiformis*)

$$\log \text{ over-bark stem volume (m}^3\text{)} = 2.054 \times \log \text{ dbh (cm)} - 7.835 \text{ (r}^2 = 0.984\text{)}$$

d²h is often used as a parameter for volume equations and volume tables instead of dbh. With using d²h, following equations were obtained.

(*E.camaldulensis*)

$$\log \text{ over-bark stem volume (m}^3\text{)} = 0.902 \times \log \text{ d}^2\text{h} - 9.501 \text{ (r}^2 = 0.999\text{)}$$

(*A.auriculiformis*)

$$\log \text{ over-bark stem volume (m}^3\text{)} = 0.870 \times \log \text{ d}^2\text{h} - 9.501 \text{ (r}^2 = 0.994\text{)}$$

Using d²h instead of dbh slightly improve the correlation coefficient (r² = 0.995 → 0.999 for *E.camaldulensis* and r² = 0.984 → 0.994 for *A.auriculiformis*). But standing tree height measurement involves considerable error especially for taller trees. Since the correlation coefficient of equations with dbh is very high, we recommend using only diameter for volume estimation because tree height measurement requires extra labour for less accurate data collection. Further data collection and analysis should be carried out for examining this matter. Volume equations reported here are the first ones in Meanok Forest Plantation. Further data collection from different age stands is recommended to enhance the reliability of the equations. Relationships between dbh and mass of each plant component (stem, stem bark, branches ≥ 2 cm, branches < 2 cm and foliage) were analysed for each age class by regression analysis (Table 2). The total mass (r² = 0.99 for both species) and the mass of stem (r² = 0.99 for *E.camaldulensis* and r² = 0.98 for *A.auriculiformis*) were well predicted on the basis of dbh (Figure 2). The regression of other biomass components were weaker but the correlation coefficient was still very high (r² = 0.91 – 0.98) except branches > 2 cm of *A.auriculiformis* (r² = 0.76). Total biomass of *A.auriculiformis* is higher than *E.camaldulensis* across the dbh range. This mainly attributes to the higher stem wood density (616 kg/m³ for *A.auriculiformis* and 556 kg/m³ for *E.camaldulensis*) and more branching characteristics of *A.auriculiformis*. The stem wood density of *E.camaldulensis* is reported as 705 kg/m³ in Pakistan (Ahmad 1996) and 980 kg/m³ (FAO 1979). Further investigation is needed to elucidate the reasons for the differences.

TABLE 2. Allometric equations for estimating stem volume and biomass of each plant component where y is logarithmic stem volume (m³) or biomass (kg) and x is logarithmic dbh (cm).

Component biomass (kg)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Acacia auriculiformis</i>
Over-bark stem volume	$y=2.375x-8.737, r^2=0.995$	$y=2.054x-7.835, r^2=0.984$
Under-bark stem volume	$y=2.467x-9.214, r^2=0.993$	$y=2.080x-8.084, r^2=0.984$
Total biomass	$y=2.452x-2.541, r^2=0.992$	$y=2.264x-1.571, r^2=0.990$
Stem	$y=2.470x-2.908, r^2=0.986$	$y=2.182x-1.899, r^2=0.978$
Bark	$y=1.987x-3.398, r^2=0.959$	$y=1.628x-2.387, r^2=0.982$
Branch > 2 cm diam	$y=4.134x-9.465, r^2=0.972$	$y=3.428x-6.684, r^2=0.756$
Branch < 2 cm diam	$y=2.195x-4.127, r^2=0.909$	$y=2.066x-3.273, r^2=0.929$
Foliage	$y=2.120x-3.736, r^2=0.973$	$y=2.153x-3.984, r^2=0.930$

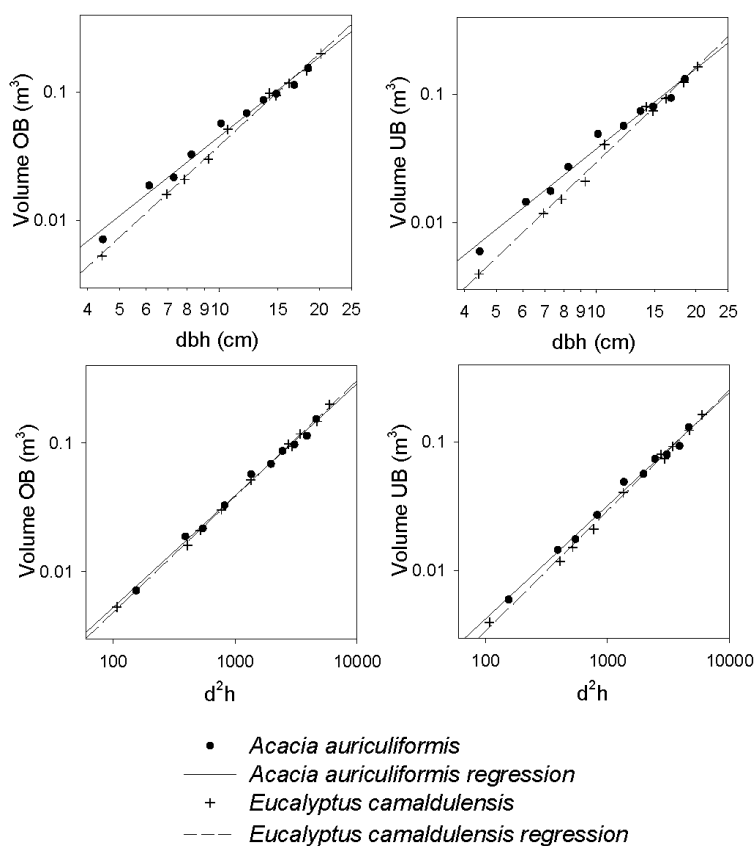


FIGURE 1. Relationship between over-bark (OB) and under-bark (UB) stem volume, dbh and d²h of *Acacia auriculiformis* and *Eucalyptus camaldulensis* trees in Meanok Forest Plantation.

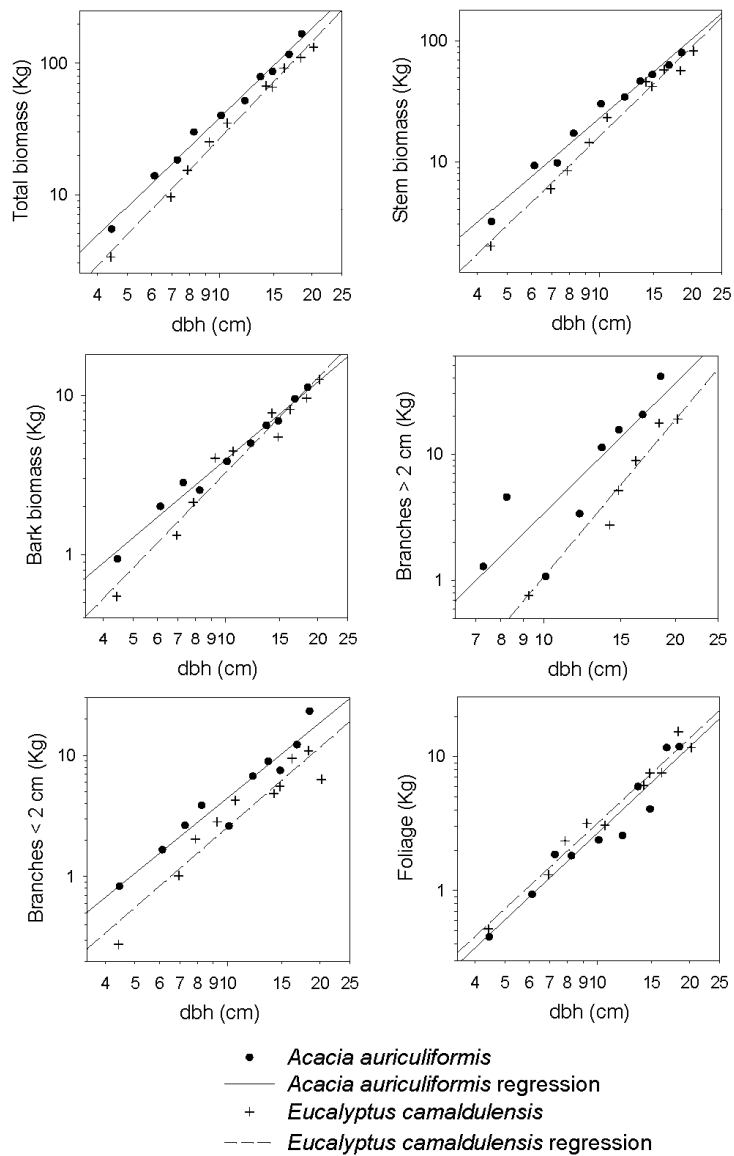


FIGURE 2. Relationship between dbh and, total biomass and each biomass components of *Acacia auriculiformis* and *Eucalyptus camaldulensis* in Meanok Forest Plantation, plotted with logarithmic scale.

Biomass Productivity and N & C distribution

Nitrogen and carbon concentrations of biomass components of *E.camaldulensis* and *A.auriculiformis* of Meanok Forest Plantation, and *L.leucocephala* of Anlong Ta Mei tree farm is shown in Table 3. Foliage nitrogen concentration of *E.camaldulensis* was only 62% of *A.auriculiformis* and 42% of *L.leucocephala*. Nitrogen fixing characteristics of *A.auriculiformis* and *L.leucocephala* would be the reason for the higher foliage nitrogen concentration. Higher foliage nitrogen concentration of *L.leucocephala* to *A.auriculiformis* probably attributes to the higher nitrogen concentration in soils at Anlong Ta Mei site (Table 1).

Biomass, carbon and nitrogen contents of 3-year-old *E.camaldulensis* stand was estimated by using forest census data in Lic and Shima (2005), biomass equations (Table 2) and, carbon and nitrogen concentration (Table 3). The mean annual biomass increment (MABI) of total biomass was 5.3 Mg/ha. MABI of stem and branch > 2 cm which can be used for gasification electricity generation was 3.4 Mg/ha. This is much smaller than the prospective estimation of biomass production of 10 Mg/ha/year used in the Master Plan (JICA 2005a). MABI of plantation trees usually dramatically increased at several years after planting. MABI of studied *E.camaldulensis* stand is likely to increased in following years but it would not probably reach 10 Mg/ha/year under the current management practice.

Stem wood accounted for 61% of total biomass but only 31% of nitrogen. Harvest only stem wood and leave bark and canopy components at the logged over site would significantly improve nutrient sustainability of plantation compared to whole tree harvesting. Meanok Plantation soils were very poor in nitrogen and probably poor in other nutrients as well. Nitrogen stored in the 3-year-old *E.camaldulensis* trees was 5% of stored in 1 m depth soil. Productivity of successive rotations would be decreased because of nitrogen (and other nutrients) depletion although growth of coppiced regenerated trees usually grows faster than initial planted generation. Conversion to nitrogen fixing tree species or mix planting with them, and fertiliser application should be considered for optimal and sustainable production. Specific leaf area of *E.camaldulensis* and *A.auriculiformis* were 7.42 m²/kg and 10.43 m²/kg respectively. Leaf area index (LAI) of the 3-year-old *E.camaldulensis* stand was 1.48. This is much lower than the LAI range of global plantations of 2.2 to 11.6 (Beadle 1997) and it indicates poor capacity of productivity of the stand.

Potential for Biomass Electricity

There are three villages (Srae Mikak, Meanok Lech and Meanok Kaeut) with total 636 households near Meanok Forest Plantation. Those villages are currently not electrified. They are located outside of 40 km circles from Phnom Penh and Campong Chhnang, which is technical limit of medium voltage line (22 kV) extension. Villages are more than 10 km away from National Highway #5 and it will take many years to the area be connected to the future national grid. The prospective selling price of the timber in Meanok Plantation is \$15/Mg (Lic and Shima 2005). Prospective wood price for biomass electricity generation is \$20/Mg. Fuel cost is minor fragment of electricity generation cost and it is possible to set even higher wood price. Lic and Shima (2005) concluded that operation in Meanok Plantation is possibly bring large financial deficit and is failure in terms of social and environmental aspect as well. Lic

TABLE 3. Carbon (C), nitrogen (N) concentration and C/N ratio of biomass components of *Eucalyptus camaldulensis*, *Acacia auriculiformis* of Meanok Forest Plantation and *Leucaena leucocephala* of Anlong Ta Mei Energy Cooperative. *n*: number of samples, *SE*: standard error.

	<i>n</i>	C		N		C/N	
		(%)	<i>SE</i>	(%)	<i>SE</i>		<i>SE</i>
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (Meanok)							
Stem	3	48.7	0.06	0.24	0.01	205.8	11.1
Bark	3	43.2	0.73	0.38	0.01	113.5	5.3
Branch > 2cm	3	47.8	0.40	0.43	0.15	137.0	37.3
Branch < 2cm	3	46.9	0.41	0.59	0.05	82.3	7.1
Foliage	3	51.3	0.37	1.61	0.09	32.2	2.1
<i>Acacia auriculiformis</i> (Meanok)							
Stem	3	48.4	0.70	0.26	0.02	188.6	12.5
Bark	3	49.2	0.14	1.48	0.09	33.5	1.9
Branch > 2cm	3	47.6	0.85	0.76	0.15	67.6	12.0
Branch < 2cm	3	48.6	0.32	1.17	0.18	43.4	6.6
Foliage	3	53.9	0.35	2.59	0.11	20.9	1.0
<i>Leucaena leucocephala</i> (Anlong Ta Mei)							
Stem with bark	4	47.0	0.37	0.75	0.07	63.8	4.8
Branch	4	46.7	0.34	0.95	0.06	49.6	3.0
Foliage	4	45.2	0.18	3.82	0.12	11.9	0.4
Fruit	4	45.2	0.21	4.83	0.42	9.6	0.7

TABLE 4. Biomass, carbon and nitrogen content in each plant components of 3-year-old *Eucalyptus camaldulensis* stand in Meanok Plantation.

	(kg/ha)					
	Total	Stem	Bark	Branch > 2cm	Branch < 2cm	Foliage
Biomass	15971.2	9710.3	2115.0	556.3	1590.0	1999.5
C	7679.4	4726.6	913.5	266.1	746.5	1026.7
N	74.9	23.1	8.1	2.4	9.2	32.1

and Shima (2005) also pointed out that involvement of and benefit to the local community is one of the most important aspects for the success of the plantation management. Biomass electrification of the area would significantly improve the living condition of the local community. Once sustainable high biomass production is realized, Meanok also has high potential for establishing megawatt class plants to supply clean renewable electricity to the future national grid.

Part 2. Anlong Ta Mei Tree Farm

BACKGROUND

Anlong Ta Mei Community Energy Cooperative (CEC) supported by SME Cambodia (NGO) in Battambang Province supplies biomass gasification electricity to about 70 cooperative members since February 2005. Anlong Ta Mei CEC only uses purchased *Leucaena leucocephala* wood planted by CEC members as the fuel for electricity generation. The details of Anlong Ta mei CEC activities are well described in JICA (2005a). CEC members plant *L.leucocephala* trees in their fallow gardens, unused land and mix with fruits trees or other cash crops. People start to cut trees at 1 m height for the first harvest at one year after planting. Coppiced branches continuously grow after the first harvest and CEC members cut the branches two to three times a year for selling to CEC. We investigated the first year *L.leucocephala* production and sustainability of the tree farming system in Anlong Ta Mei CEC.

Anlong Ta Mei village is located about 15 km south of Battambang and the coordinates is



PHOTO 2. Biomass destructive measurement in Anlong Ta Mei *Leucaena leucocephala* tree farm. (Top left) Interviewing the farm owner. (Top right) Sorting biomass components. (Bottom left) Tree measurement. (Bottom right) Weighing stems.

103°10' E and 13° 00' N. The altitude is about 20 m a.s.l. Average annual rainfall in Battambang between 1985 and 2001 was 1288 mm (JICA 2005b). Soil type in Anlong Ta Mei is classified as Eutric Gleysols (FAO 1974).

METHODS

In Anlong Ta Mei tree farms, *L.leucocephala* trees are planted densely (mainly 1 x 1 m) and the harvesting cycle is very short (< 1 year). The regression analysis method we used for Meanok Plantation (refer Part 1) is not suitable for the case of Anlong Ta Mei. Instead of establishing equations to estimate biomass of individual trees, we harvested 10 plots, total 266 m² in four sites (Table 5). Plot sizes are different at each site because of differences of farm size and planting methods. In the plots, we measured diameter at base and 1 m in height then harvested all trees at 1 m. Total 176 trees were harvested. Branches, foliage and fruits of each tree were sorted and weighed (Photo 2). Sub samples were collected and weighed for moisture content determination and chemical analysis. 25 trees were cut at ground level to determine regression of base diameter to the stem mass. The correlation coefficient (r²) of the obtained regression was 0.98. Stem weight of individual trees was estimated using the regression. Method of sample processing, chemical analysis and soil profile survey is same as the method

BOX 2. Soil profile description of Anlong Ta Mei site.

Profile # 0501 Anlong Ta Mei, Bannan District, Battambang Province. *Leucaena* tree farm.

Coordinates: 103°10' E, 13° 00' N. Altitude: 20m. Topography: flat, flooding in 1993 & 1994 (twice to date). Land form: plain. Land element: floodplain, Position: higher part. Gradient: flat. Form: complex. Micro-topography: no micro-relief. Parent material: not known. Erosion: no erosion. Land use: first year *Leucaena leucocephala* tree farming at abandoned orange farm.



Hori zon	Depth (cm)	Color (moist)	Notable features
O	0.5 - 0		Very little standing litter layer.
A	0 - 12	10YR 5/4	No mottling / clay loam / no rock fragment / very weak fine angular blocky / firm / non sticky / non plastic / few very fine roots / clear smooth boundary
B	12 - 70	10 YR 2/3	Many coarse mottling (10 YR 3/1) / clay loam / no rock fragment / very weak fine angular blocky / firm / slightly sticky / non plastic / very few fine and very fine roots / gradual boundary
C	70 +	10YR 4/2	No mottling / clay / no rock / very weak fine angular blocky / firm / slightly sticky / non plastic / very few fine and very fine roots

used in Part 1 of this report.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil Profile

Description and a photograph of 1 m depth soil profile are shown in Box 2. Soil texture is clay loam or clay. Soil colour was blownish gray (10YR 5/4) for A horizon, blownish black (10YR 2/3) for B horizon and grayish yellow brown (10YR 4/2) for C horizon. More blackish colour in B horizon than A horizon indicates higher organic matter accumulation in B horizon. Upper part of B horizon (12-40 cm) contains higher concentrations of carbon and nitrogen than A horizon (Table 1). The reason for higher organic matter accumulation in sub soil compared to surface soil is not clear. However, the area where soil profile survey was conducted (Site 1, Table 5) was abandoned garden. Some farming activity might cause higher organic matter in the subsoil. Carbon and nitrogen contents of Anlong Ta Mei soil were much higher than the soil in Meanok (Table 1). Consequently Anlong Ta Mei is much more preferable condition for plant growth compared to Meanok.

Biomass Productivity

The results of the biomass production survey is summarised in Table 5. Among four sites surveyed, three sites were pure *L.leucocephala* stands and the other one was mix planting with guava and orange trees. The mixed planting site was the only irrigated site. The spacing in the pure stands was 1 x 1 m. All stands were 10 or 12 months old. Woody biomass per tree at mixed planting site was 40 to 250% higher than other three sites. The higher wood production largely attributes to water irrigation of the mixed planting site, but compost application to the base of fruit trees might also affect the growth of *L.leucocephala*. Average annual woody biomass production of three un-irrigated pure stands at the first year was 8.2 Mg/ha/year. Coppicing branches of *L.leucocephala* grow much faster than initial planting stems. When we observed the same site three months after the survey, the coppiced branches were as large as pre-harvest size. The woody biomass production of following years will probably much higher than the prospective biomass production of 10 Mg/ha/year in the Master Plan prepared by MIME and JICA (2005a). Tewari *et al.* (2004) reported up to 50 Mg/ha/year biomass productions of *L.leucocephala* in India under the similar management method with Anlong Ta Mei but productivity varied depending on management methods and site conditions (Kumar *et al.* 1998). The Department of Agriculture in Battambang province is conducting small scale research and recorded about 80 Mg/ha/year of *L.leucocephala* branches at fourth year annual harvest without irrigation (Ponh, un-published data).

Nutrient Sustainability

Carbon and nitrogen concentrations of each biomass components are shown in Table 3. Mass and, carbon and nitrogen accumulation in 10-12 month old *L.leucocephala* is shown in Table 6. Biomass of foliage and fruits accounted for 21% of total biomass but it accounted for 55% of total nitrogen stored in trees. *L.leucocephala* foliage and fruits are nutrient rich stock feed and

TABLE 5. Summary of biomass production of *Leucaena leucocephala* tree farming in Anlong Ta Mei Community Energy Cooperative in Battambang Province. All biomass data is based on oven dry weight.

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4
Surveyed plots	4m x 4m x 3plots	5m x 5m x 2plots	4m x 4m x 3plots	20m x 3m x 2plots
Area surveyed	48 m ²	50 m ²	48 m ²	120 m ²
Number of planted trees	48	41	52	47
Number of survived trees	45	34	52	45
Planting method and spacing	1 x 1m, pure stand	1 x 1m, pure stand	1 x 1m, pure stand	1m x 3m, orange and guava trees are planted between the <i>Leucaena</i> rows
Irrigation	No	No	No	Yes
Previous status of the land	Abandoned orange garden. No fruits production last 3 years. Mango was planted with <i>Leucaena</i> but all died.	Abandoned orange garden. Back yard of a farmer's house. Disturbance by cows and children?	Abandoned orange garden. Chili was planted with <i>Leucaena</i> and grew well.	Mix planting with Orange and Guava.
Planted time	May & June 2004	August 2004	August & September 2004	June 2004
Age	12 months	10 months	10 months	12 months
Branch (> 1m) biomass (Mg/ha)	5.08	3.81	3.14	3.27
Stem (0-1m) biomass (Mg/ha)	3.76	3.03	3.19	2.13
Total woody biomass (Mg/ha)	8.84	6.84	6.33	5.40
Woody biomass per tree (kg)	0.94	1.01	0.58	1.44
Annual wood production in the first year (Mg/ha/year)	8.86	8.20	7.55	5.45
Foliage (Mg/ha)	1.96	1.77	1.57	1.74
Fruits (Mg/ha)	0.04	0.26	0.30	0.52
Total above ground biomass (Mg/ha)	10.85	8.87	8.19	7.67

people also consume them. There is much larger impact of nitrogen budget (as well as other nutrient) in the case of whole tree harvesting compared to the case only woods are harvested. Applying organic matter and fertilized (eg. compost) would be necessary in the case of whole tree harvesting to maintain sustainable production. If 10 Mg/ha woody biomass is harvested annually as prospected in the Master Plan (JICA 2005a), about 95 kg/ha of nitrogen is exported from the site. This is only 0.8% of total nitrogen stored in 1 m depth of the soil. In addition, *L.leucocephala* has nitrogen fixing characteristics. We could conclude that nitrogen depletion

TABLE 6. Biomass, carbon and nitrogen contents of each biomass components in *Leucaena leucocephala* 1-year-old (10 – 12 month) stands at Anlong Ta Mei Community Energy Cooperative tree farm in Battambang Province.

	(kg/ha)				
	Branch (> 1m)	Stem (0-1m)	Foliage	Fruits	Total
Biomass	4011.2	3326.7	1767.2	201.0	9306.1
C	1873.2	1563.5	798.8	90.9	4326.4
N	38.1	25.0	67.5	9.7	140.3

would probably not occur at Anlong Ta Mei tree farming site if only woody biomass is harvested. But it is required to investigate sustainability of other important nutrient such as phosphorus, potassium, calcium and magnesium to evaluate sustainability of biomass production. Moreover, it is necessary to study the case of higher yield and whole tree harvesting.

Overall Conclusions

In the Master Plan (JICA 2005a), tree farming by local farmers is recommended as the primary biomass fuel supply source. We have found that preferable biomass yield of *L.leucocephala* in Anlong Ta Mei CEC tree farms. Status of soil nutrient sustainability was preferable as well. It would not be very difficult to maintain sustainable biomass production without causing soil nutrient depletion. On the other hand, biomass productivity in Meanok Plantation was very poor. Soil nutrient was very low and long term sustainable high yield would not be realised under the current management practice. Species screening, fertilizer application, mixed species planting and native species natural regrowth management should be conducted or considered. Sustainable biomass production by tree farming at clay soils of Eutric Greysols (Anlong Ta Mei type) is likely to be achieved. On the other hand, species selection, biomass productivity and appropriate management methods should be studied for tree farming at sandy soil of Ferric Acrisols and Gleyic Acrisols (Meanok type). There are many other different kinds of soils in the country. Intensive research should be carried out to establish localised appropriate methods of biomass fuel production for each region in the country. Sustainable tree farming or tree plantation management is one of the most important key issues for biomass electricity generation. Biomass electricity is a very useful tool for rural electrification and clean energy supply. But the renewable energy production system is only realised when biomass fuel is produced under sustainable manner. The data we collected in this presented study is very limited. Long term productivity and nutrient cycling of tree farm and plantation is exceedingly needed.

REFERENCES

- Ahmad, T. (1996). Eucalyptus in Pakistan. In M. Kashio & K. White (Eds.), *Reports submitted to the regional expert consultation on eucalyptus. Volume II*. Bangkok: FAO.
- Beadle, C. L. (1997). Dynamics of leaf and canopy development. In E. K. S. Nambiar & A. G. Brown (Eds.), *Management of soil, nutrients and water in tropical plantation* (pp. 169-205). Canberra: ACIAR.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The nature and properties of Soils* (12 ed.). New Jersey: Prentice-Hall.
- FAO-Unesco. (1974). *Soil map of the world*. Paris: Unesco.
- FAO. (1979). *Eucalypts for planting*. Rome: FAO.
- FAO. (1990). *Guidelines for soil description* (3 ed.). Rome: FAO.
- JICA. (2005a). *Interim report for the master plan study on rural electrification by renewable energy in the Kingdom of Cambodia*. JICA. Phnom Penh.
- JICA. (2005b). *Weather observation data*. JICA. Phnom Penh.
- Lic, V., & Shima, T. (2005). *Plantation and natural re-growth forests: the growth and use by local villagers*. Phnom Penh.
- Kimmins, J. P. (1997). Predicting sustainability of forest bioenergy production in the face of changing paradigms. *Biomass & Bioenergy*, 13(4-5), 201-212.
- Kumar, B. M., George, S. J., Jamaludheen, V., & Suresh, T. K. (1998). Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multipurpose trees grown in

- woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India. *Forest Ecology & Management*, 112(1-2), 145-163.
- Ministry of Environment, Kingdom of Cambodia. (2002) *Cambodia's initial national communication under the United Nations framework convention on climate change*. MOE. Phnom Penh.
- Research Council for Agriculture, Forestry and Fisheries. (1997). *Standard soil color charts*. Research Council for Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Tewari, S. K., Katiyar, R. S., Ram, B., & Misra, P. N. (2004). Effect of age and season of harvesting on the growth, coppicing characteristics and biomass productivity of *Leucaena leucocephala* and *Vitex negundo*. *Biomass & Bioenergy*, 26(3), 229-234.