

発電用バイオマスの輸入について ～PKSの供給可能量に関する一考察～（後編）

利用部 資源・システムグループ 古俣寛隆

■インドネシアの再生可能エネルギー固定価格買取制度

インドネシアは、電力の需要量に対して供給量が不足しています。また、首都ジャカルタ以外では送電網がまだ十分に整備されていないため、電化率が低くなっています¹⁾。そのため、政府は民間資本の活用による電力供給量の増大を図っています。そのひとつに再生可能エネルギー固定価格買取制度（Feed-in Tariff, 以下、FITという）があり、バイオマス由来の電力も買取対象となっています。表1にインドネシアにおける直接燃焼（10MW以下）のバイオマスFIT売電単価²⁾を示しました。

10MW以下の発電所における売電単価は、低電圧連系と中電圧連系に分かれています（なお、10MWを超える発電所は交渉により売電単価が決まります）。低電圧連系の方が基本売電単価は高く、この基本売電単価に地域毎の“係数（F）”を乗じて最終的な売電単価が決定されます。電化率の低い地域では高い係数が設定され、売電単価が優遇されています。買取期間は20年ですが、期間内に単価の変更があればそれが適用される点は日本のFITと異なります。これら売電単価をインドネシアの電力購入単価の平均（1035Rp./kWh）と比較すると、中電圧連系で最大1.8倍、低電圧連系で最大2.3倍となります。ただし、インドネシア技術評価応用庁によれば、今のところ、国内FIT発電所向けにPKS（Palm Kernel Shell）が大量消費されている事例は聞こえていないとのこと。また、石炭火力発電へのPKSの混焼はFITの対象外であり、その取り組みは試験段階にとどまることでした。しかしながら、インドネシアにおいて

は、電力供給量不足に加え、地球温暖化対策についても喫緊の課題であるのは間違いなく、今後PKSの国内需要が急増する可能性は否定できません。PKSの供給可能量については、インドネシア国内の動向も注視していく必要があると思われます。

■PKSの実際の利用可能量は？

エネルギー鉱物資源省²⁾によれば、2013年のインドネシアにおけるPKSの発生量は614万tとなっています。同省に数値の根拠について問い合わせたところ、各工場の実際の発生量を積み上げたものではなく、消費されるFresh Fruit Bunch（以下、FFBという）質量の5.5%をPKS発生量として計算しており、ボイラーでの自家消費分は控除されていないことが分かりました。果たして日本での実際の利用可能量はどのくらいなのでしょう？

前報において、バイオマスボイラーを稼働させるためにはMF（Mesocarp Fiber）のみでは足りないため、産出する90%のPKSを自家消費していたパームオイル工場の事例を報告しました。ただし、この消費割合は過大である可能性も考えられました。

そこで、パームオイル工場におけるバイオマスボイラーの定常運転を仮定し、PKS自家消費率の理論値を算出しました。算出には（1）式を用いました。

$$\text{換算蒸発量(t/h)} = \{ \text{低位発熱量(MJ/h)} \times 10^3 (\text{kJ/MJ}) \times \text{ボイラー効率}(\%) / 100 \} / \{ 2257 (\text{kJ/kg}) / 1000 (\text{kg/t}) \} \quad (1)$$

前提条件は以下のとおりです。文献³⁾を参考に、換算蒸発量30t/hのバイオマスボイラーを使用して、FFBを40t/h消費する典型的なパームオイル工場を設定しました。なお、このFFB消費量とボイラー出力（換算蒸発量）の関係については、実際の必要蒸気量（実際蒸発量）は、FFB消費量1t/hあたり0.6～0.73t/hとされている^{3,4)}ことから、妥当な設定条件であると考えます。ボイラー燃料は、MFとPKSの2種類のみとし、MFから先に消費して不足する分をPKSで補うこととします。この条件で換算蒸発量が30t/hとなるときの、PKSの自家消費率を算出しました。

表1 インドネシアにおける直接燃焼（10MW以下）のバイオマスFIT売電単価

連系電圧	売電単価	単位
低電圧	1500 × F*	Rp./kWh
中電圧	1150 × F*	Rp./kWh

*F:ジャワ島:1.00,スマトラ島:1.15,スラウェシ島:1.25,カリマンタン島:1.30,バリ島・バンカ・プルトウン島・ロンボク島:1.50,リアウ島・パプア島・その他:1.60

FFBの質量に対するMF、PKSの発生率に関しては、既往の報告事例⁵⁻¹¹⁾を参考に設定しました(表2)。各工場におけるバラツキは、Dura, Teneraの品種によって副産物の構成比が異なること、分別精度や基準となる含水率が異なるためと考えられます。本推計では、単純平均値に近かったHambali E. et al.の発生率(MF:14.4%, PKS:6.4%)⁹⁾を代表値として計算しました。ここで、既往の報告(表3)をみると、発生するMFの全てが自家消費されているわけではないようです。おそらく、分別時のロス等により品質的に燃料に適さないMFが一定程度発生しているものと思われます。そこで、表3を参考にMFの自家消費率は85%に設定しました。

MFおよびPKSの低位発熱量は、文献¹²⁾よりそれぞれ11.48MJ/kg, 14.55MJ/kgに設定しました。ボイラー効率については工場によって71から84%までと差が大きい³⁾ため、70から85%までの幅を持たせて算出しました。

PKS自家消費率の算出結果を図1に示しました。PKSの自家消費率は、ボイラー効率によって大きく異なり、63~109%の範囲となりました。この設定条件においては、ボイラー効率の最も高い85%の条件においても63%のPKSは自家消費されると算出されました。ここで、既往の報告^{3,13-15)}(表3)では、PKSの自家消費率は50~80%の範囲にあります。

実際には、各工場におけるボイラー効率、単位FFBあたりの蒸気消費原単位、含水率および低位発熱量などの諸条件は様々であるため厳密な推計は困難ですが、MFのみではパームオイル工場のバイオマスボイラーを稼働できないのは確かであると思われました。

以上の結果を参考として、インドネシアとマレーシアのPKS余剰量を(2)式により推計しました。なお、PKS余剰率は(3)式のとおり定義しました。

$$\text{PKS余剰量 (t/年)} = \text{FFB生産量 (t/年)} \times \text{PKS発生率 (\%)} \times \text{PKS余剰率 (\%)} \quad (2)$$

ここで、

$$\text{PKS余剰率 (\%)} = 100 (\%) - \text{PKS自家消費率 (\%)} \quad (3)$$

各国のFFBの生産量については、FAO¹⁶⁾より2014年の値を引用しました。パームオイル工場におけるPKS発生率はFFB比6%と7%の2種類とし、PKS余剰率は20, 30, 40, 50および60%に設定しました。推計の結果、

PKSの余剰量は267~935万t/年と算出されました(表4)。

ここで、Mohannad¹³⁾は、PKSの50%の余剰のうち、20%は工程の分別ロス、品質およびパームオイル工場へのアクセスなどの問題により収集が困難であり、実際に販売可能なPKSの割合は30%(余剰となるPKSの60%)であると述べています。余談ではありますが

表2 FFBの質量に対するMF、PKSの発生率に関する既往の報告事例

引用	対FFB質量比 (%)		文献番号
	MF	PKS	
Prasertsan et al. (1996)	12.5	7.1	5)
Mahlia et al. (2001)	10.6	5.2	6)
Hayashi (2007)	14.3	6.7	7)
白井ほか (2009)	12.5	6.5	8)
Hambali et al. (2010)	14.4	6.4	9)
GIZ (2014)	15.0	6.5	10)
Uemura (2016)	12.0	5.0	11)
* 参考: ptpn7より筆者聞き取り	17.0	9.0	-

注) 最大値と最小値が示されているものは平均値を採用した

表3 パームオイル工場におけるMFとPKSの自家消費率

引用	自家消費率 (%)		文献番号
	MF	PKS	
Dit (2007)	n.d.	50	13)
Nasrin et al. (2011)	90	80	3)
	80	10注)	
	75	70	
	73	68	
	85	60	
	80	60	
Setiadi et al. (2014)	85	55	14)
Aghamohammadi et al. (2016)	95	50	15)

注) MF, PKSの他にEFBの60%を自家消費している

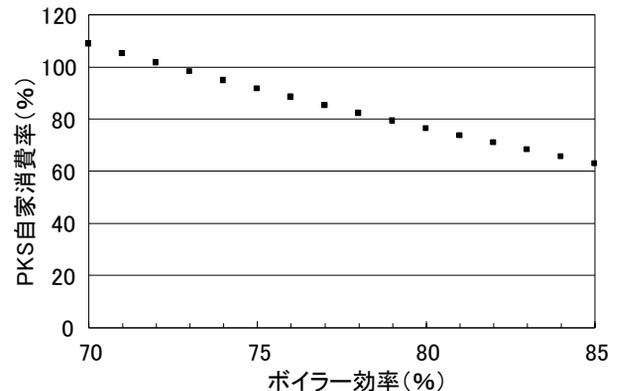


図1 パーム工場におけるPKS自家消費率の推計結果

表4 インドネシアとマレーシアのPKS余剰量

単位(万t/年)

	FFB 生産量	PKS 発生率	PKS 発生量	PKS余剰割合				
				20%	30%	40%	50%	60%
インドネシア	12,659	6%	760	152	228	304	380	456
		7%	886	177	266	354	443	532
マレーシア	9,607	6%	576	115	173	231	288	346
		7%	672	134	202	269	336	403
計	22,266	6%	1,336	267	401	534	668	802
		7%	1,559	312	468	623	779	935

が、工場へのアクセスに関しては、都市部はもとより郊外の幹線道路においても自動車とバイクが非常に多い上に、道路の舗装状態が悪い、信号がないなどの理由でしばしば渋滞が発生しており、現状では交通インフラはまだ十分に整備されていないという印象を受けました。現状では、内陸部にあるパームオイル工場からのPKSの大量輸送の実現可能性について少々の疑問を感じた次第です。

さて、両国からのPKS余剰量は最も良い条件（PKS発生率：7%、PKS余剰率：60%）においても935万t/年と推計されました。前述のとおり、実際に販売可能なPKSの割合を余剰となるPKSの60%とすれば、その量は561万t/年となります。当然のことながら、販売可能量の全てが日本向け製品とはならず、日本での実際の利用可能量は、インドネシアやマレーシア

におけるFITを要因とする国内消費、日本以外の海外の需要動向などを割り引いて考える必要があります。さらに、供給量がタイトになるにつれ価格が上昇するという可能性も十分に考えられます。

以上のことから、あくまで前報に記載した日本のPKSの年間消費量379万t/年¹⁷⁾をベンチマークとすれば、東南アジアからのPKSの日本への供給量は不足する可能性がある判断されます。

■PKS以外の有望なバイオマスは？

我が国のFITの一般木材バイオマス区分（輸入バイオマス）に該当すると考えられる、インドネシアの地域別バイオマス発生量²⁾を表5に示しました（注：「発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン」¹⁸⁾に基づく証明が必要）。まず、各

表5 FITの原料区分に該当するインドネシアの地域別バイオマス発生量

単位(万t)

	FITの原料区分に 該当するバイオマス	スマトラ島	カリマン タン島	ジャワ島・ バリ島・マ デューラ島	スラウエシ 島	パプア州	マルク州	ヌサ・トゥ ンガラ州	計
アブラヤシ	PKS	454	140	1	14	4	0	0	614
	MF	949	294	3	29	8	0	0	1,283
	EFB*1	1,775	549	5	55	15	0	0	2,399
	茎葉	4,942	2,350	22	218	20	0	0	7,552
	幹(植え替え時)	704	113	25	0	0	0	0	841
サトウキビ	バガス	296	0	630	30	0	0	0	956
	茎葉	218	0	474	24	0	0	0	715
ゴム	幹(植え替え時)	1,313	591	0	0	0	0	0	1,904
ココナッツ	繊維	33	6	23	24	9	12	4	112
	殻	11	2	8	8	3	4	2	38
稲	籾殻	306	89	703	146	3	3	53	1,302
	稲わら	2,141	620	4,920	945	18	20	372	9,037
トウモロコシ	コーンコブ	100	7	235	62	0	1	21	426
	茎葉	351	26	821	216	1	3	74	1,492
木材	廃棄物*2	176	38	10	14	14	3	13	268

*1: Empty Fruits Bunch

*2: wood wasteと英表記

原料における茎葉、幹、籾殻、稲わらなどは発生量が多いですが、収穫等の際にプランテーションや農地で広範囲に発生・分布するために、現実的には収集が困難であると思われます。もし、PKSの不足量が小さい場合には、不純物の割合が低く、ハンドリング性の高い木質系燃料が有望であると考えられます。現地カウンターパートからは、木質ペレットおよびブリケットの供給可能量と価格に関する話題提供があり、FOB (Free On Board, 船積み込みまでの価格) でペレットが105USD/t, ブリケットが190USD/t, 1000t/月程度の供給が可能とのことで、原料には認証を受けた植林木が使われるとのことでした。インドネシアには今のところ大規模な製造工場はないとのことでしたが、日本からのニーズが高まればペレットやブリケットによる一定程度の代替の可能性があると思われます。実際に、タイやベトナム等の東南アジア産木質ペレットの日本への輸入量は年々増加傾向にあり、現地では大型工場の建設も進んでいるようです。しかしながら、現状では発熱量あたりの単価はPKSよりも木質ペレットの方が高価であるため、発電事業者としてもその混焼割合には採算性の確保の面で上限があると考えられます。

一方、PKSが大量に不足する場合には、代替燃料として何が考えられるのでしょうか？一か所に、まとまった量が発生し、かつ未利用という条件に合致するのはEFB (Empty Fruits Bunch) しかないと思われます。ただし、EFBはアブラヤシプランテーションの栄養分として散布されているとのことでしたので、実際の利用可能量についての検討は必要です。また、高い含水率をどのように減少させるか、カサ密度の高いEFBをどのように日本まで輸送するか、採算性の合う単価で調達できるかなどの詳細な検討が必要不可欠です。

■まとめ

東南アジア地域のアブラヤシプランテーションは、1848年にギニアからボゴール植物園にもたらされた4本の苗が起源とのことでした (アブラヤシは結構長生きで、その木は1993年まで生きたそうです)。今後も、パームオイルの世界的な需要増加のトレンドは続いていくとみられ、それに伴いPKSの余剰量も増加すると思われます。しかし、パームオイル工場が発生するPKSのうち余剰となるPKSは、計算の上では最大で60%程度になるものの、実際には10%しか余剰とならない工場もあることが分かりました。パーム

オイル工場からのPKSの余剰率は、ボイラー効率や燃料の含水率などに大きく左右されるものと考えられます。FITによる自国内消費や日本以外の海外の需要動向を総合的に鑑みれば、日本へのPKSの供給は決して安定的なものではないと考えられました。パームオイル産業からのPKS以外の副産物について、大量供給が可能と思われるバイオマスとしてはEFBが有望であると思われましたが、その実際の利用については技術的、コスト的に詳細な検討が必要不可欠です。

■謝辞

現地カウンターパートのSalim氏、インドネシアのバイオマス利用全般、数値など根拠の引用などについてご指導いただいたBPPTのMaharani氏、Alfonsus氏およびEdi博士、本稿をまとめるにあたって有用なご助言を頂いたマレーシアペトロナス工科大学の上村教授、そして調査にご協力いただいた全ての事業者の方々に感謝いたします。

本調査は、(一社)木材加工技術協会の海外研究活動特別助成を受けて実施しました。ここに記し、深く感謝いたします。

■文献

- 1) DIREKTORAT JENDERAL KETENAGALISTRIKAN KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL: Statistik Ketenagalistrikan 2014, p.26 (2015)
- 2) Ministry of Energy and Mineral Resources: INVESTMENT GUIDELINES BIOENERGY IN INDONESIA, p. 49, 75-81 (2016)
- 3) A. B. Nasrin et al.: Journal of Engineering and Applied Sciences 6 (6), 433-439 (2011)
- 4) Agency for the Assessment and Application of Technology: INDONESIA ENERGY OUTLOOK 2016, p. 87 (2016)
- 5) Prasertsan, S. et al.: Biomass Bioenergy 11 (5), 387-395 (1996)
- 6) Mahlia T. M. I. et al.: Energy Conversion and Management 42, 2109-2118 (2001)
- 7) Kiichiro Hayashi: Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2007, 646-651 (2007)
- 8) 白井義人ほか: 環境バイオテクノロジー学会誌, 9 (1), 3-10 (2009)
- 9) Hambali E. et al.: The 7th Biomass Asia Workshop Nov. 29 - Dec 1, Jakarta, Indonesia (2010)

- 10) GIZ: Biomass Potential Indonesian Agroindustry, p.27 (2014)
- 11) Yoshimitsu Uemura: Biomass in Malaysia: Type Potential and Available Technologies, UTP Green Technology Open Short Course26 & 27 Oct 2016, CAPE, Kuala Lumpur
- 12) Rizky Fauzianto: Journal of Sustainable Development Studies 5 (1) , 100-115 (2014)
- 13) Mohanmad Dit: Proceedings of Chemistry and technology conference, 275-287 (2007)
- 14) Tjandra Setiadi et al.: Sustainable Waste Managemant in Palm Oil Mills, 3E Nexus First Kick-off Meeting, 24-25 February, 2014 in Male, Maldives
- 15) Nasrin Aghamohammadi et al: Sustainability 8, 416 (2016)
- 16) FAO STAT
<http://Fenix.fao.org/faostat/beta/en/#data/QC>
- 17) オンサイト・レポート249号 (2016/10/19)
- 18) 林野庁HP:
http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/hatudenriyou_guideline.html