

第99回CIS研究所パートナー会議事録(一般様用)

開催日: 2020年8月23日(日)

場 所: CIS会議室

講 師: 久米 健次 様

テーマ: スターリングエンジン

低温度差スターリングエンジンの力学系モデリング

ー自律非平衡熱機関の物理学に向けて

(泉田:日本物理学会誌 2020 vol.75 No.6 p324-328)

「スターリングエンジンの力学系としてのモデリング」

1) 歴史

スターリングエンジンは19世紀初頭にスコットランドのスターリングによって考案された外燃機関。スターリングサイクルは、理論上はカルノー効率が達成される。



会議風景

スターリングエンジン:

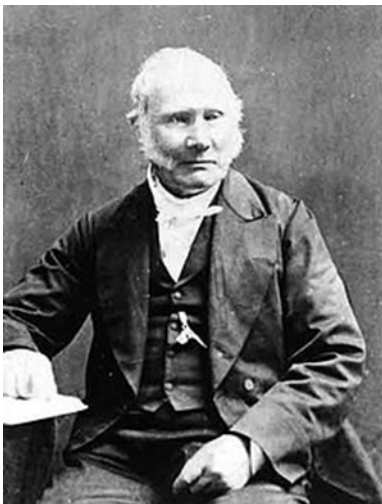
19 世紀初頭にスコットランドの R. Stirling によって考案された高温熱源と低温熱源の二つの熱源間の温度差を利用して動く外燃機関. スターリングエンジンを理想化したスターリングサイクルは等積加熱, 等温膨張, 等積冷却, 等温圧縮の 4つの熱力学的過程から構成される. 熱の再生器があれば理論上カルノー効率が達成されるサイクルとして知られる.

2) 熱機関や熱学の歴史

1664-1729	ニューコメン	
蒸気機関		
1736-1819	ワット	新方式の蒸気機関
1796-97頃	ランフォードの実験	
砲身をくりぬくとき、水が沸騰。熱は運動の一形態ではないか？		
支持者少ない…トマス・ヤング(1773-1829)の支持		
1816年	スターリングエンジン	
1824年	サジ・カルノー「火の動力」	
～1845年	熱の正体解明	ジュール、ヘルムホルツ
1860	ルノワール	ガスエンジン(石炭ガス)
1865	クラウジウス	エントロピーの概念
1871	ベンツ	
1877	オットー	オットーサイクル
1883-1885	ダイムラー、マイバッハ	

スターリングエンジンは熱の本性が未解明でカルノーの研究に先立って発明された。

ウィキペディアより



ロバート・スターリングは、スコットランド・パース・アンド・キンロスのメスヴェン近郊で

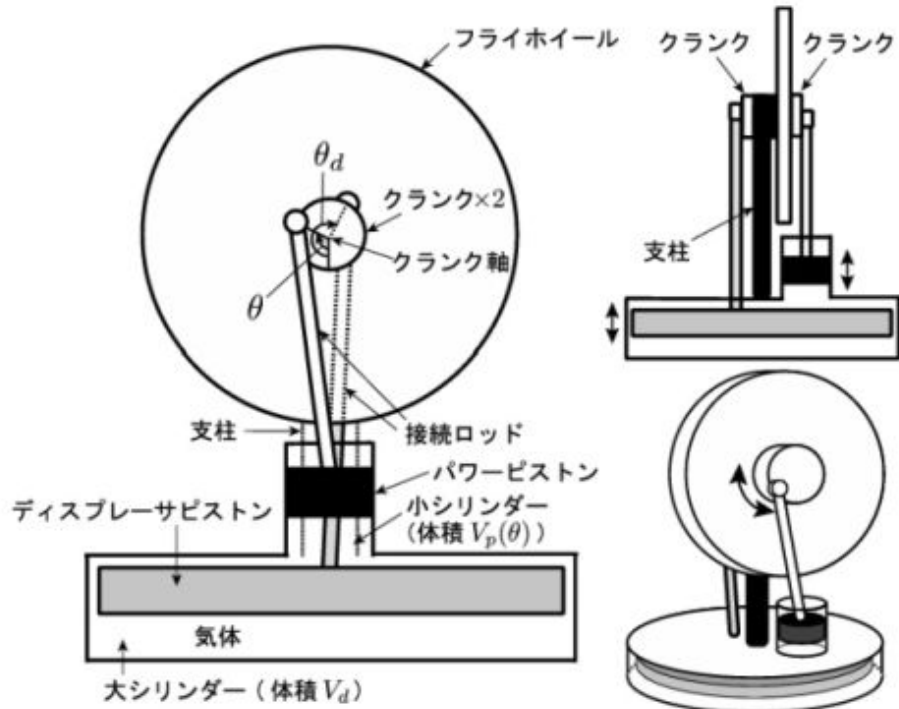
8人兄弟の3番目として生まれた。父親の影響で工学に興味を持ち、またグラスゴー大学、エディンバラ大学でラテン語・数学・倫理学・修辞学なども学んだが、結局神学を勉強して1816年にスコットランド教会の牧師となった。そしてすぐに、赴任した教区で多くの労働者が蒸気機関の爆発事故で怪我をしたり命を落としたりするのに直面し、心を痛めるようになった。この頃、動力源としてワット式蒸気機関が主流であったが、効率をあげる為にボイラーの高圧化が進められ、それにより爆発事故が相次いでいたのである。(なお、高圧化にはワット式蒸気機関の開発者であるジェームズ・ワット自身も反対していた。)

それでも、当時は安全よりも利益が優先され、高圧化の流れが止まることになかったため、スターリングは安全性が高く、効率的な動力源を開発することにした。そして開発されたのが、現在スターリングエンジンと呼ばれるエンジンである。これは当時「hot air engine (熱空気エンジン)」と呼ばれ(スターリング自身は「Heat Economiser (熱節約装置)」と呼んだ)、1819年に実用的なものが開発された。

日本スターリングエンジン普及協会は、スターリングエンジンの実用化・普及を促進する目的で設立した特定非営利活動法人(NPO)です。スターリングエンジンの歴史は長く200年に及びますが、民生エンジンとしての実用化は困難を窮め、今日に至りました。しかし、スターリングエンジンは長いトンネルを抜け、ようやく実用化・普及(量産)の時代を迎えようとしています。その第1弾が2010年後半に本格量産される米国INFINIA Corp.の太陽熱スターリングエンジン(3kW)です。私共は、これを契機に、続々と各種エンジンが発表、発売されることを期待しているところです。スターリングエンジンの実用化・普及のための目標は、従来のエンジンでは活用困難な未利用エネルギーの利用(太陽熱、バイオマス、廃熱等)や従来のエンジンが不得手とする分野であります。INFINIA Corp.が太陽熱スターリングエンジンから量産・販売を開始することは、正に理にかなっていると言えます。スターリングエンジンの実用化・普及には、エンジン開発と同じように用途開発・未利用エネルギー利用技術の研究開発、とりわけ市場の要求・用途にマッチしたシステムの提供が必要です。その上、スターリングエンジンに関わる規格や法的整備、社会的理解の促進と利用環境の醸成が必要となります。

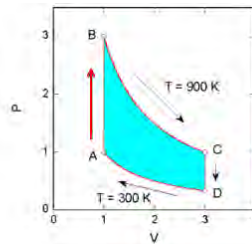
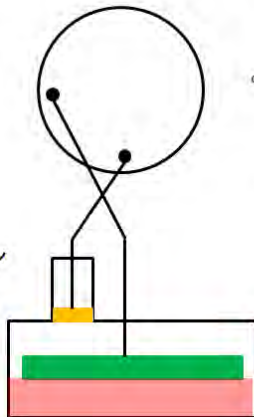
日本スターリングエンジン普及協会は、スターリングエンジンの普及を目指し、普及に関わる種々の課題に取り組んでいます。日本スターリングエンジン普及協会: <http://www.eco-stirling.com/http://www.eco-stirling.com/>

3) NASAの依頼でSenft氏が開発したN92型スターリングエンジン



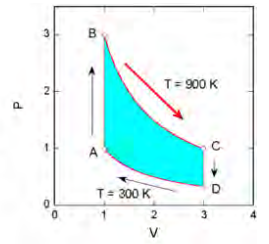
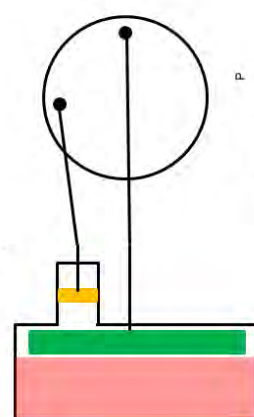
時計回り

パワーピストン
～等積加熱

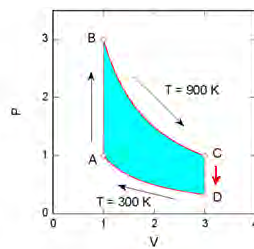
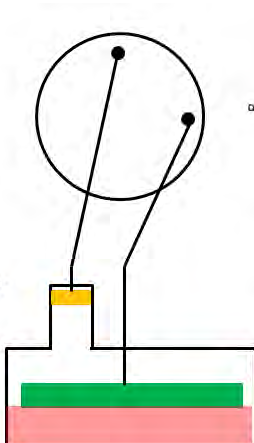


実際には、上図のような理想化されたPV図のプロセスでは表せない。あくまでも、概念図

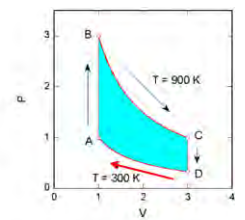
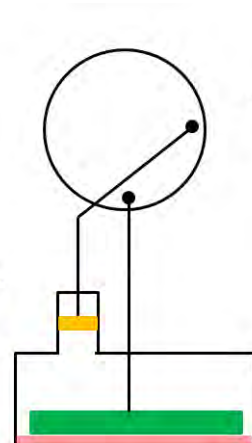
パワーピストン
～等温膨張

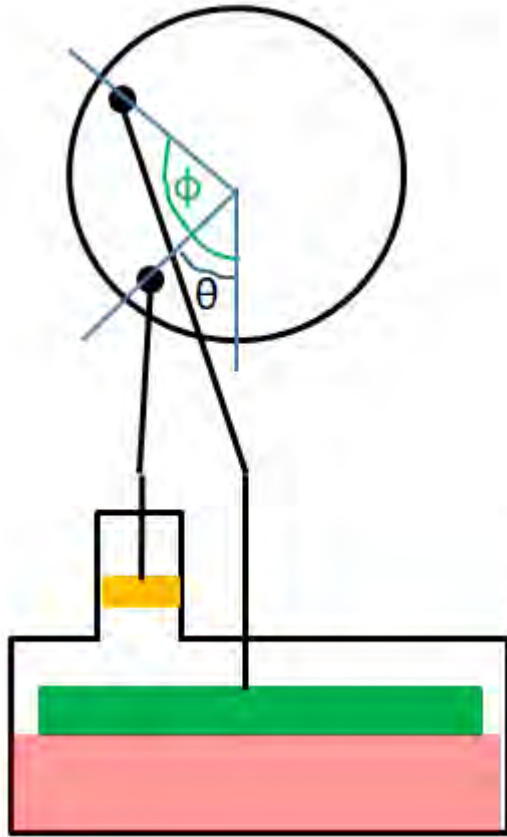


パワーピストン
～等積冷却



パワーピストン
～等温圧縮





ディスプレイサピストンの角度を ϕ として

$$V_C = V_0 \frac{1 + \cos \phi}{2} \quad \text{低温領域のピストンの体積}$$

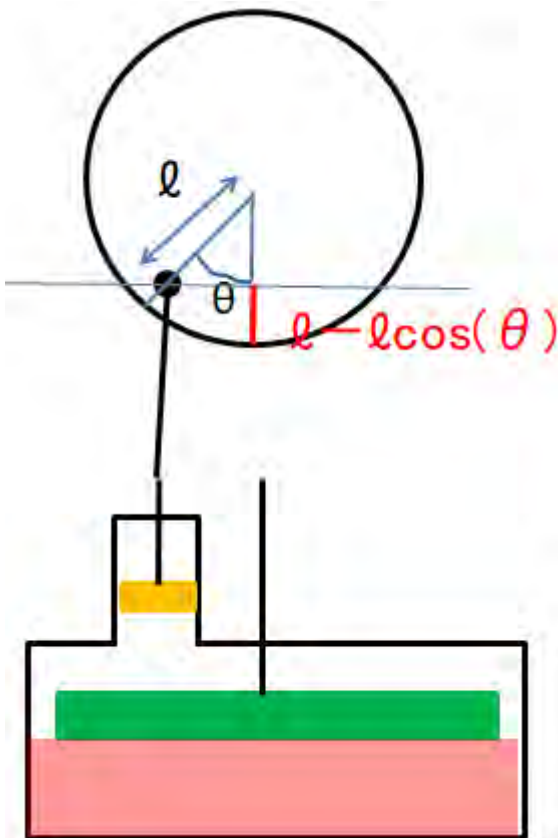
$$V_H = V_0 \frac{1 - \cos \phi}{2} \quad \text{高温領域のピストンの体積}$$

$$V_0 = V_C + V_H$$

ピストンの有効温度 T_{eff} を、高温 T_H と低温 T_C の体積による加重平均で定義する

$$\begin{aligned} T_{\text{eff}} &= \frac{V_C T_C + V_H T_H}{V_C + V_H} \\ &= \frac{1 + \cos \phi}{2} T_C + \frac{1 - \cos \phi}{2} T_H \\ &= \frac{T_C + T_H}{2} + \frac{T_C - T_H}{2} \cos \phi \end{aligned}$$

$$\frac{p_{\text{eff}} V_0}{nR} = T_{\text{eff}} = \frac{T_C + T_H}{2} + \frac{T_C - T_H}{2} \cos \phi$$



$$\frac{p_{\text{eff}} V_0}{nR} = T_{\text{eff}} = \frac{T_C + T_H}{2} + \frac{T_C - T_H}{2} \cos \phi$$

はずみ車が $\theta \sim \theta + \Delta\theta$ まで回転する際に、パワーピストンの移動距離は

$$l \cos(\theta) - l \cos(\theta + \Delta\theta) \sim l \sin \theta \Delta\theta$$

パワーピストンとディスプレイサピストンの位相が α ずれているとして: $\phi = \theta + \alpha$

$$p_{\text{eff}}(\theta) = \frac{nRT_{\text{eff}}}{V_0} \left[\frac{T_C + T_H}{2} + \frac{T_C - T_H}{2} \cos(\theta + \alpha) \right]$$

パワーピストンが1回転する間に外に向かってする仕事を大雑把に見積もると

$$\begin{aligned}\int_0^{2\pi} p_{\text{eff}}(\theta) dV &= \int_0^{2\pi} p_{\text{eff}}(\theta) S \ell \sin \theta d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} nR \frac{S \ell}{V_0} \sin \theta \left[\frac{T_C + T_H}{2} + \frac{T_C - T_H}{2} \cos(\theta + \alpha) \right] d\theta\end{aligned}$$

S はパワーピストンの断面積。 第1項はゼロ。 第2項は

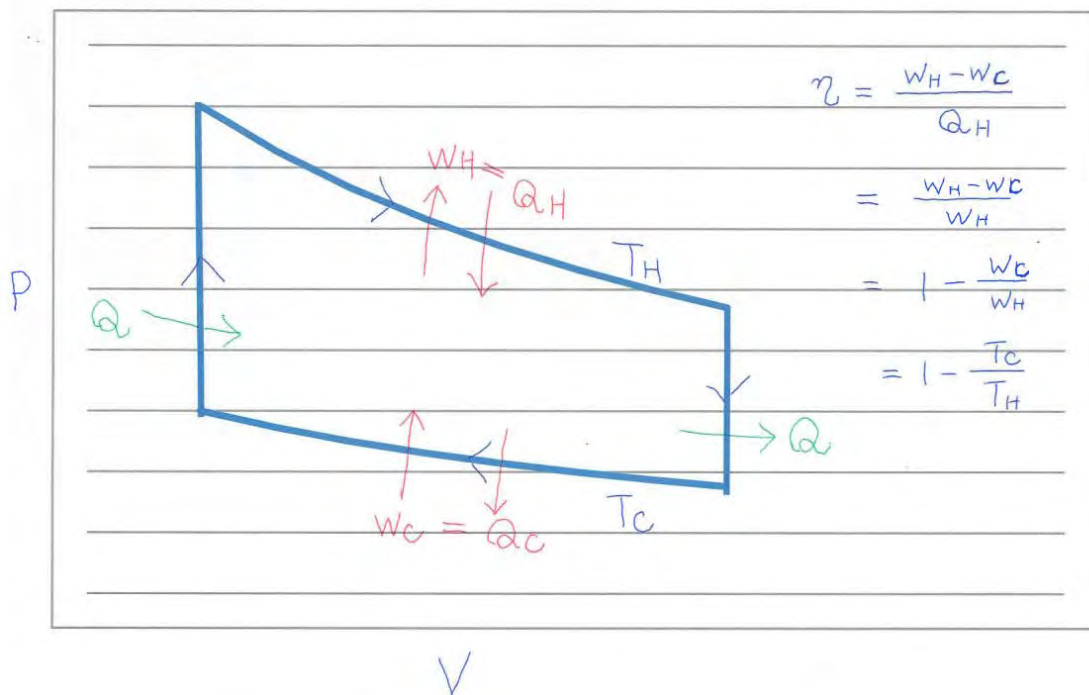
$$\sin \theta \cos(\theta + \alpha) = (\sin(2\theta + \alpha) - \sin \alpha)/2$$

より、積分値は

$$nR \frac{S \ell}{V_0} \frac{T_C - T_H}{2} (-1/2)(2\pi) \sin \alpha = \frac{\pi}{2} nR \frac{S \ell}{V_0} (T_H - T_C) \sin \alpha$$

$\alpha = \pi/2$ で最大。 温度差に比例する。

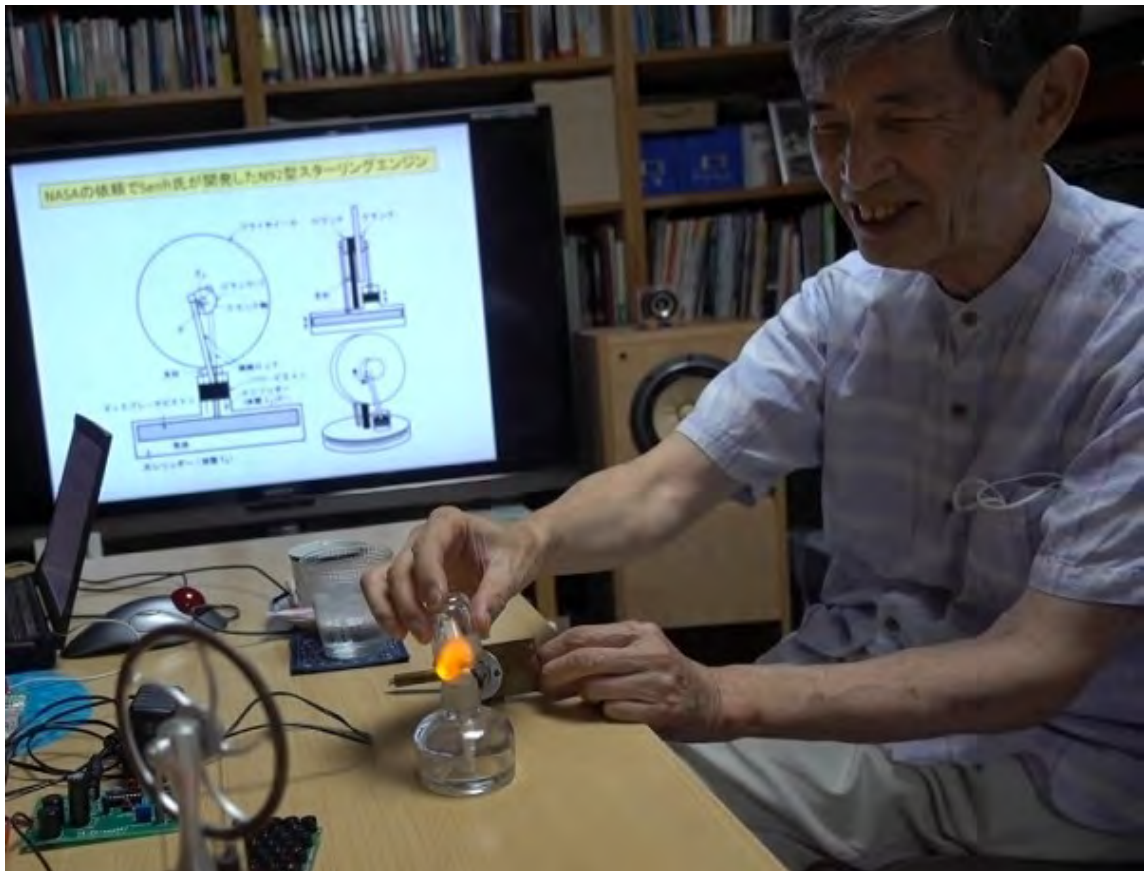
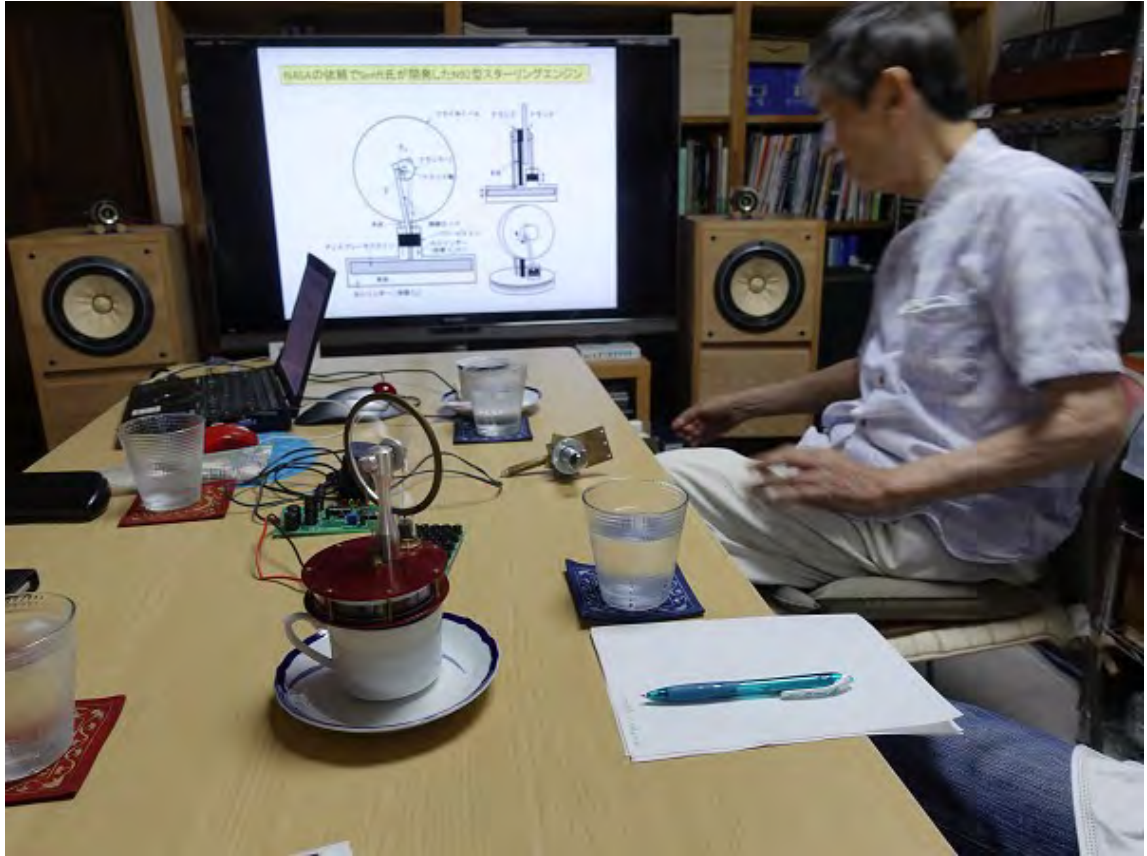
スターリングエンジンの理論上の熱効率は、カルノーサイクルの熱効率に一致する。 $1 - \frac{T_C}{T_H}$



実際のサイクルのPV図はこんな理想形ではないし、熱平衡が実現されているわけでもない。実用化は、焼却炉の排熱利用や特殊な目的に限られるのではなかろうか

理学系との違いは、電気系技術者は、苦手となっている熱力学が出てくると理解しにくい傾向にある。まずやってみてから考えるのが早道のように思えます …… 山本のボヤキ

4) 西村さん自作:新らしく開発中のスターリングエンジン



* 新作の完成時に再度実験をお願いします。

CF: ひとつ前の世代の試作(西村さん)

(2020. 2. 16 第95回CISパートナー会議_西村様 資料より)

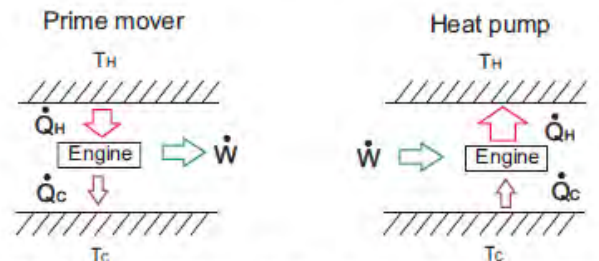
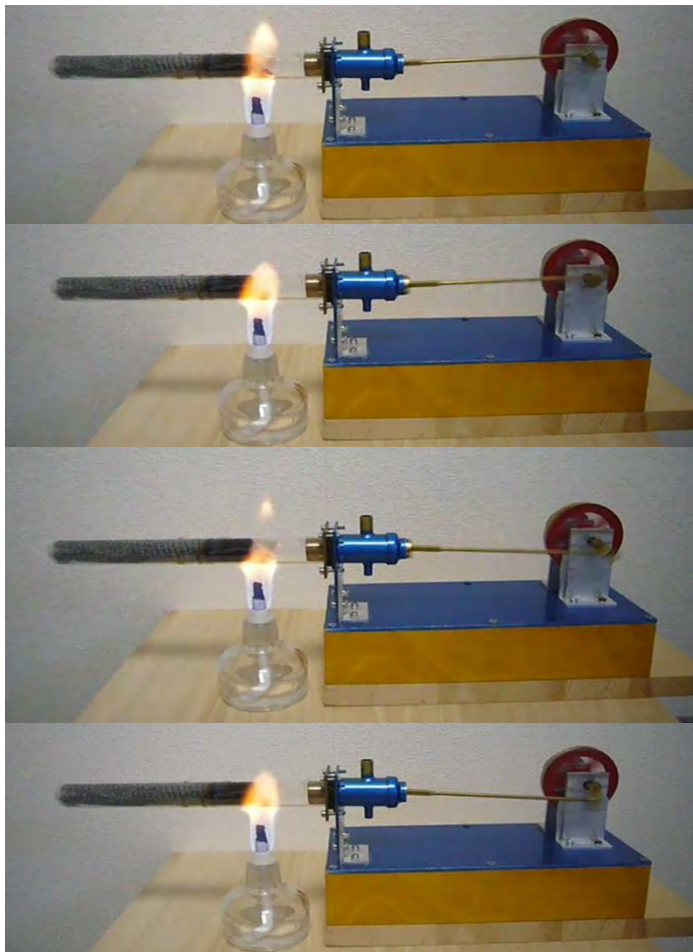
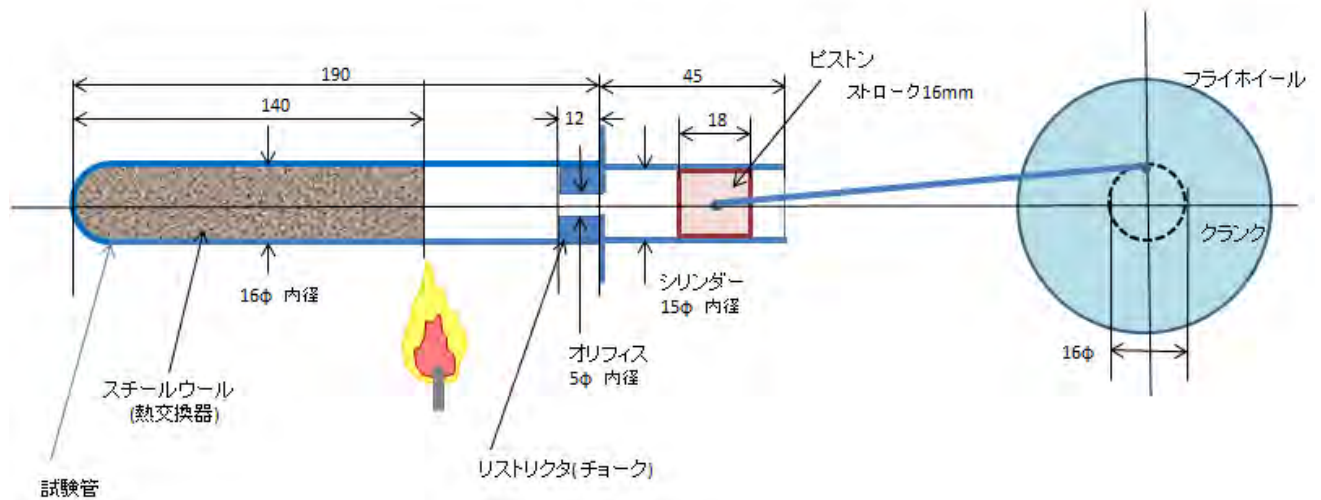


Figure 1: The principle of the prime mover (engine) and the heat pump (refrigerator)

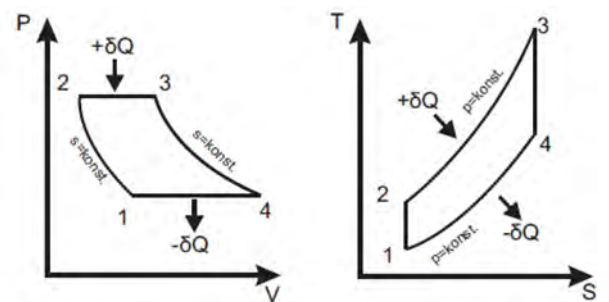


Figure 4: Schematic p-V and T-s diagram of the ideal thermoacoustic cycle.
1-2 adiabatic compression; 2-3 isobaric heat transfer;
3-4 adiabatic expansion; 4-1 isobaric heat transfer

動画 2010年9月23日、17:36:42

5) 実用化されているスターリングエンジン

（現在は、排熱していた熱を利用する程度）

排熱回収システムと電気推進船「鶴洋丸」の概要

スターリングエンジンの原理

スターリングエンジンは、温度差のある熱源により、内部の気体を膨張・収縮させて駆動力を得る外燃機関です（図1）。理論熱効率が高いこと、多種・多様な熱源を利用できること、爆発がないため静かで振動の少ないことなどの特徴があります。

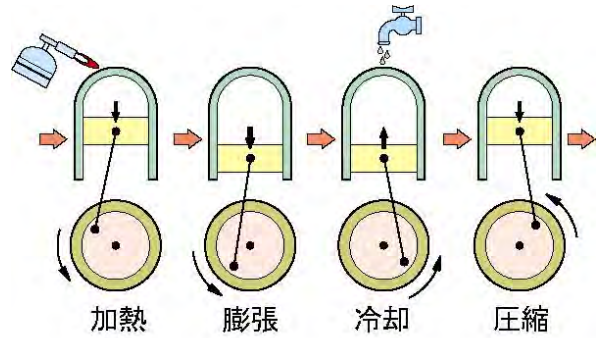


図1 スターリングエンジンの基本原理

電気推進船「鶴洋丸」

鶴洋丸は、(株)渡辺造船所で建造され、平成22年7月に就航した総トン数749 GTの電気推進船です（図2）。

表1に本船の主要目、図3（次頁）に本船の配置図を示します。



図2 電気推進船「鶴洋丸」

排熱回収スターリングエンジン電気推進船「鶴洋丸」に搭載するスターリングエンジンは、**300℃程度の排ガスを熱源として、3kW程度の発電**をすることができます（図4）。発電開始・停止の制御システムも同時に開発しているため、船舶の運航時には常に排熱回収発電が行われます。給電される船内の100V系統に対して、8～10％程度の省エネ効果が見込まれます。

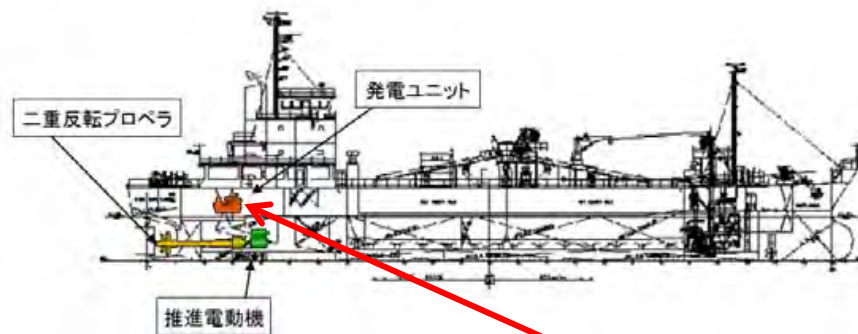


図4 排熱回収スターリングエンジン

表1 電気推進船「鶴洋丸」の主要目

船主	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 佐伯汽船株式会社
荷主/オペレータ	太平洋セメント株式会社/東 海運株式会社
建造造船所	株式会社渡辺造船所
船種	セメント運搬船
長さ×幅×深さ	72.0 m×14.6 m×7.60/4.71 m
総トン数	749GT (二層甲板船)
載貨重量トン数	2200トン
計画航海速力	12.5 ノット
海上試運転時速力	14.4 ノット (満載 58 %状態にて)
推進方式	ラインシャフト二重反転プロペラ
発電機	800 kW×3 基
推進モータ	900 kW×2 基
インバータ制御装置	2 基
完工日	平成22年7月14日

〔一般配置図〕



〔機関室配置の概略〕

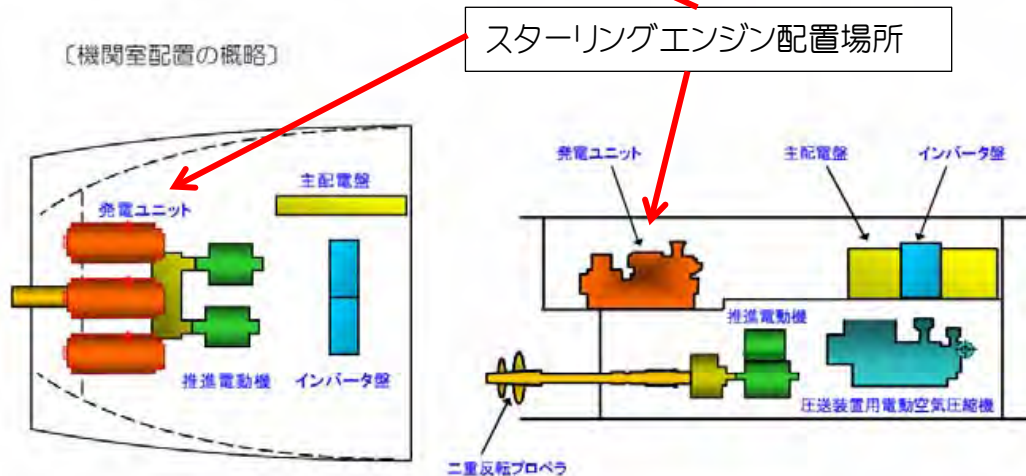
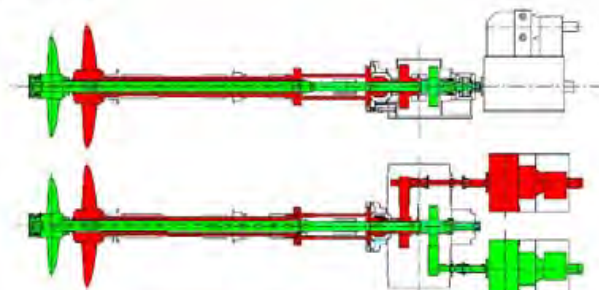


図3 電気推進船「鶴洋丸」の配置図及び機関部の概略

〔二重反転プロペラ〕



6) By the way ～ 風力発電

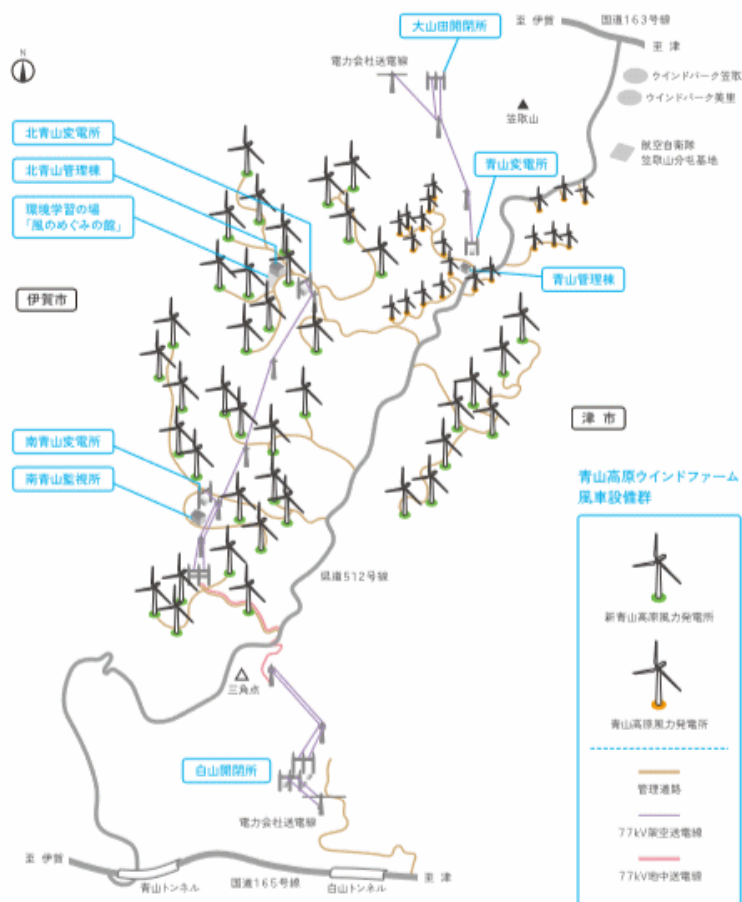
地球環境にやさしいクリーンエネルギーを生む

青山高原の例

青山高原 ウィンドファーム



真夏でも涼しい



全体の配置図

株式会社 青山高原ウィンドファームHPより

発電容量:

(株)青山ウインドファーム
 750kW ×20基 → 15000kW
 2000kW×40基 → 80000kW
 合計 95000kW ~ 100MW
 → 100MW×0.2(利用率) ~ 20MW
 原発1基 ~ 100万kW =1000MW

CF: 日本最大:島根県「新出雲ウインドファーム」78MW

- ・10MW級の風力発電 建設費用 約30億円
 - ・風力発電の買取価格は約18円/kWh(年々下落)
 風力発電所は、平均風速が6m/s以上程度を想定
 → 設備利用率~20%
 - ・10MWの風力発電所 年間の収入
 =10000kW×20%×18円/kWh×24時間×365日=3億1536万円
 建設費用は30億円
 運転維持費 年間 6000円/kW×10000kW=6千万円
 - ・20年間の費用=30億(初期)+12億(維持/年)×20年=42億円
 20年間の収入=3億1536万円×20年=63億720万円
- 仮に、平均風速が5m/sになると、設備利用率は15%程度に下がり、収入は4分の3の47億3040万円になる。気温にも依存する。

費用:

20年間の費用
 =30億円(初期)+12億円(維持/年)×20年=42億円

収益:

平均風速 6m/s	買取価格 22 円/kWh	77 億 880 万円
平均風速 5m/s	買取価格 22 円/kWh	57 億 816 万円
平均風速 5m/s	買取価格 16 円/kWh	42 億 48 万円

* 上記の試算によれば、収益性の改善が必要と思われます。

- ・ 久居市の全域の電力を賄うことで計画されたようである。

電源	規模	(参考) 2018 年度	(参考) 2019 年度	(参考) 2020 年度	2021 年度
陸上風力発電	全規模	20 円＋税	19 円＋税	18 円＋税	—
陸上風力発電 (リブレース)		17 円＋税	16 円＋税	16 円＋税	—

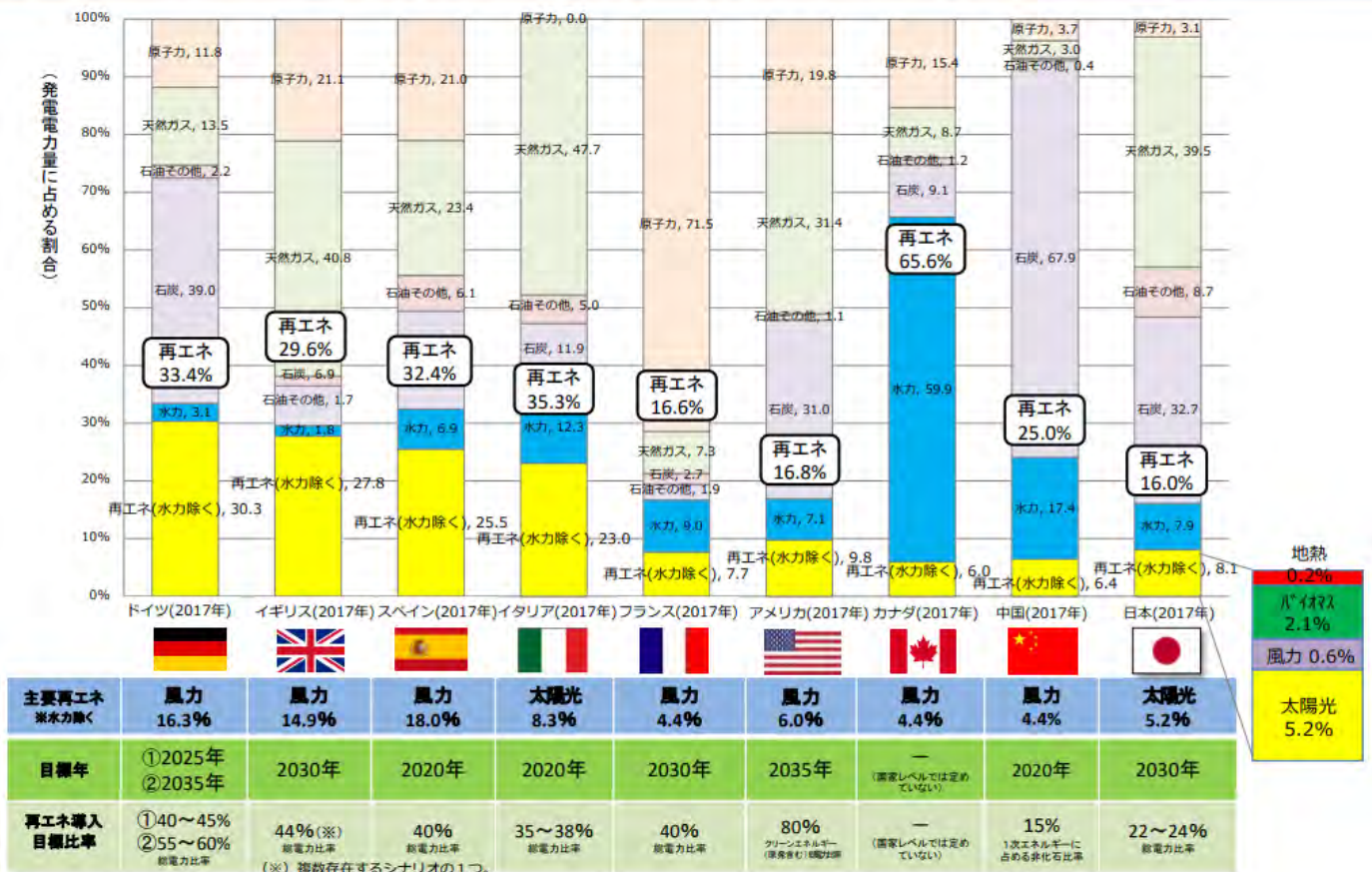
世界の動向 （出典:経済産業省 資源エネルギー庁）

国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案

2019年9月 資源エネルギー庁 https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/046_01_00.pdf

①世界の動向：再生可能エネルギーの導入状況（ii）

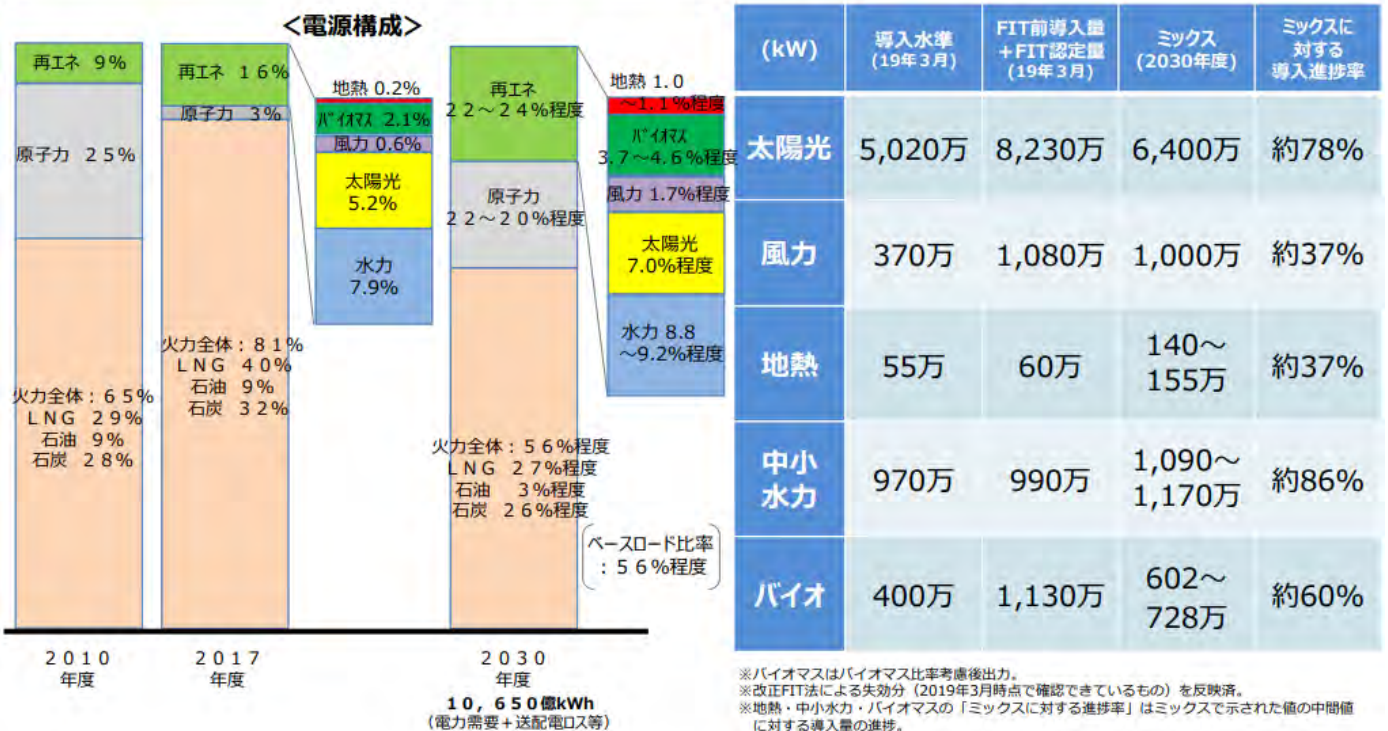
4



②日本の動向：再生可能エネルギーの導入状況（iii）

8

- 2030年度のエネルギーミックスの再エネ比率は22～24%となっており、まずはこの実現に向けて、国民負担を抑制しつつ、**再生可能エネルギーの最大限の導入を図っていく必要がある。**



②日本の動向：FIT制度の調達価格

10

電源 【調達期間】	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	価格目標
事業用太陽光 （10kW以上） 【20年】	40円	36円	32円	29円 ※1 27円 ※1 7/1～（料率適用期間終了後）	24円	入札制（2,000kW以上） 21円 （10-2,000kW）		入札制 （500kW以上） 14円 （10-500kW）				7円 （2025年）
住宅用太陽光 （10kW未満） 【10年】	42円	38円	37円	33円 ※2 35円 ※2 出力制御対応機器設置義務あり（2020年度以降は設置義務の有無にかかわらず適用区分）	31円 ※2 33円	28円 ※2 30円	26円 ※2 28円	24円 ※2 26円				卸電力 市場価格 （2025年）
風力 【20年】	22円（20kW以上）／ 55円（20kW未満）（2017年度下期の20kW以上は21円）					20円		19円		18円		8～9円 （2030年）
						18円 （リブレース）		17円		16円		
	36円（洋上風力（霜床式・浮体式））					36円（霜床式）（一般海域利用ルール適用要件は、ルール開始に合わせて入札制移行）		36円（浮体式）				
バイオマス 【20年】	24円（バイオマス液体燃料）（2017年度下期の20,000kW以上は21円）					入札制						FIT制度 からの 中長期的な 自立化を 目指す
	24円（一般木材等）（2017年度下期の20,000kW以上は21円）					入札制（10,000kW以上） 24円（10,000kW未満）						
	32円（未利用材）					32円（2,000kW以上） 40円（2,000kW未満）						
	13円（建設資材廃棄物）											
	17円（一般廃棄物その他バイオマス）											
※3 ※4	39円（メタン発酵バイオガス発電）（主産物・副産物を原料とするメタン発酵バイオガス発電は、原料は事業計画に準づく。原料はエーストスターが提供される全ての地区の廃、自給型に限定しても可。）											
地熱 【15年】	26円（15,000kW以上・新設）					20円（15,000kW以上・リブレース（全設備更新型）） 12円（15,000kW以上・リブレース（地下設備活用型））						FIT制度 からの 中長期的な 自立化を 目指す
	40円（15,000kW未満・新設）					30円（15,000kW未満・リブレース（全設備更新型）） 19円（15,000kW未満・リブレース（地下設備活用型））						
水力 【20年】	24円（1,000-30,000kW・新設）					(2017年度上期は24円) 20円（5,000-30,000kW・新設） 27円（1,000-5,000kW・新設） 12円（5,000-30,000kW・既設導水路活用型） 15円（1,000-5,000kW・既設導水路活用型）						
	29円（200-1,000kW・新設）					21円（200-1,000kW・既設導水路活用型）						
	34円（200kW未満・新設）					25円（200kW未満・既設導水路活用型）						

※3 新設燃料は、新設燃料も含めて、持続可能性に関する専門的・技術的な検討において持続可能性の検証方法が決定されたもののみをFIT制度の対象とし、この専門的・技術的な検討の結果を踏まえ、調達価格等算定委員会が取扱いを検討。

※4 右記添付案件について、一般木材等・未利用材・建設資材廃棄物との混入を行うものは、2019年度よりFIT制度の新規認定対象とならないことを明確化し、2018年度以前に既に認定を受けた案件が容量市場の適用を受ける場合はFIT制度の対象から外す。一般廃棄物その他バイオマスとの混入を行うものは、2021年度よりFIT制度の新規認定対象から除き、2020年度以前に認定を受けた案件が容量市場の適用を受ける場合はFIT制度の対象から外す。

7) Topics 超低価格PC

フル装備のノートPC、なぜこのような低価格なのか、理解できない。



画像にマウスを合わせると拡大されます

GLM 超軽量 薄型 PC ノートパソコン 日本語キーボード Microsoft Office 2019 / Windows 10 / INTEL x5-Z8350 / WIFI / USB3.0 / HDMI / WEBカメラ / 14.1インチ / SSD64GB / メモリ4GB

ブランド: GLM

★★★★☆ 2,176個の評価 | 171が質問に回答済み

Amazon's Choice windows

価格: **¥34,800** & 配送料無料

Amazonクラシックカード新規ご入会で**5,000**ポイントプレゼント
入会特典をこの商品に利用した場合**29,800円 34,800円**に

フォームファクタ	ラップトップ
音声コマンド	Touch Pad
OS	Windows 10 Pro
通信形式	Wi-Fi
ブランド	GLM
商品の重量	1.36 キログラム

驚きのスペックです。

日本語キーボード Microsoft Office 2019 / Windows 10 / INTEL x5-Z8350 / WIFI / USB3.0 / HDMI / WEBカメラ / 14.1インチ / SSD64GB / メモリ4GB

Windows 10		Windows 10
Microsoft Office 2019		Officeがついている。
SSD64GB		HDDでなく、SDDがついている。

スマホと比べてさらにビックリ！

9万円以上で通信費が必要

2019年
9月20日発売

iPhone

iPhone 11 Pro 512GB



毎月のお支払額 **4,150円** (税込)

実質負担金 **95,450円** (税込)
かえトクプログラム適用時

※ご購入後13ヵ月目～25ヵ月目までに新たな機種に買い替えし、購入された機種を当社が回収した場合、分割支払金の最終回分75,190円がお支払い不要

※現金販売価格/支払総額: 170,640円 (「賦払金 4,150円×23回」+「最終回支払い金額 (24回目): 75,190円」)。実質年率: 0%、頭金: 0円、支払回数: 24回、支払期間: 26ヵ月

▼ご注意事項
かえトクプログラムについて詳しくはこちら >

以上