

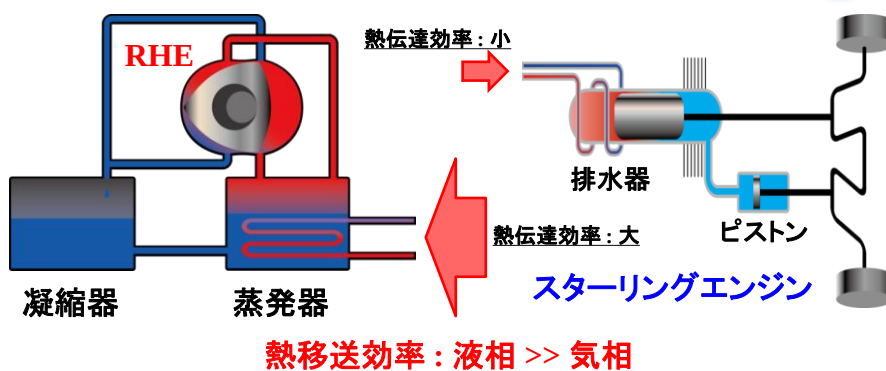
未利用熱エネルギーの活用 『低温廃棄熱回生とロータリー熱エンジン』



2014年7月24日

独立行政法人理化学研究所
光熱エネルギー電力化研究チーム
東 謙治

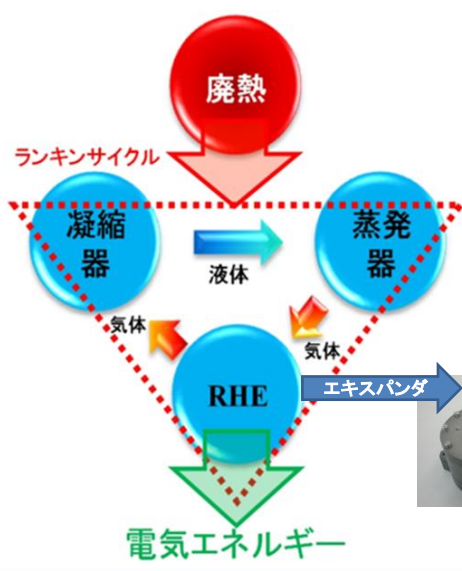
ランキンサイクルとカルノーサイクル



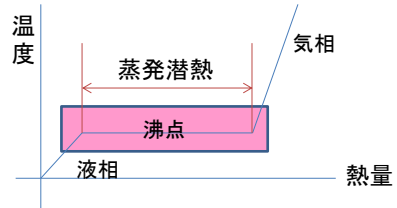
	RHE	スターリングエンジン
システム	ロータリーサイクル = 損失 小	レシプロサイクル = 損失 大
サイクル	オーガニックランキンサイクル 作動液 = 液相と気相 温度差が小さい場合でも作動する	カルノーサイクル 作動液 = 気相のみ 温度差が大きい場合に作動する



ランキン・サイクルについて



ランキン・サイクルの構成と特長
熱仕事効率
 $1 - (T_c/T_h) = 1 - (Q_c/Q_h) \dots\dots ?$



エンジンの熱仕事効率とランキン・サイクルのシステム熱仕事効率とは異なる。例としてコンバインド・サイクルのシステム熱仕事効率は非常に高い。



エキスパンダの種類と特徴



タービンは動圧を利用して、回転エネルギーに変換する衝動型エンジン。吸排気の行程が長い。ピーク領域の存在。高圧領域では熱仕事効率が高い。

スクリューエキスパンダやスクロール、ラジアルタービンなどは各々に特徴があり、エンジンの特性に合った作動流体を選択する事が重要である。

ロータリーエンジンは静圧を利用して回転動力に変換する容積型エンジン。吸排気の行程が短い。圧力vs出力がリニア。低圧領域で4.5%程度の熱仕事効率。



エキスパンダの種類と特徴

理想的な作動流体の条件

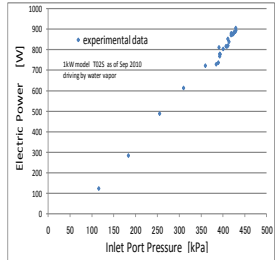
インペタン

温度		飽和圧力		飽和蒸気エンタルピー		蒸発潜熱	飽和蒸気比容積
K	°C	atm	kPa-gage	cal/mol	J/g	J/g	m ³ /kg
T	t=T-273	P1	(P1-1) × 101.325	Hsv	(Hsv/72.2) × 4.18605	r	v ^{''}
301.025	28.0	1.000	0.0	5.968	346.02	346.02	0.327355
310.000	37.0	1.351	35.6	6.188	358.77	337.84	0.246357
320.000	47.0	1.848	85.9	6.432	372.92	328.51	0.183144
330.000	57.0	2.474	149.4	6.689	387.82	318.82	0.138698
340.000	67.0	3.247	227.7	6.921	401.27	308.79	0.106731
350.000	77.0	4.189	323.1	7.166	415.47	298.36	0.083296
360.000	87.0	5.319	437.6	7.409	429.56	287.34	0.065748
370.000	97.0	6.661	573.6	7.644	443.19	275.63	0.052396
380.000	107.0	8.238	733.4	7.888	457.33	263.28	0.042091

作動流体選択のポイント

- ・蒸発潜熱
- ・飽和蒸気比容積
- ・毒性及び危険性
- ・腐食性
- ・適度な分子量

圧力と発電量(実測値)



水

温度		飽和圧力		飽和蒸気エンタルピー		蒸発潜熱	飽和蒸気比容積
K	°C	atm	kPa-gage	kcal/kg	J/g	J/g	m ³ /kg
T	t=T-273	P1	P1 × 98.0665 - 101.325	Hsv	Hsv × 4.18605	r	v ^{''}
373.000	100.0	1.03323	0.0	639.15	2,675.5	2,256.5	1.673000
383.000	110.0	1.46090	41.9	642.81	2,690.8	2,229.6	1.209940
393.000	120.0	2.02460	97.2	646.31	2,705.5	2,201.9	0.891524
403.000	130.0	2.75460	168.8	649.64	2,719.4	2,173.2	0.668136
413.000	140.0	3.68500	260.1	652.78	2,732.6	2,143.6	0.508494
423.000	150.0	4.85380	374.7	655.72	2,744.9	2,112.8	0.392447
433.000	160.0	6.30250	516.7	658.43	2,756.2	2,080.9	0.306756
443.000	170.0	8.07640	690.7	660.90	2,766.6	2,047.6	0.242553
453.000	180.0	10.22400	901.3	663.10	2,775.9	2,012.8	0.193800



バンケル型ロータリーエンジンの特徴

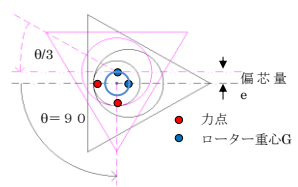
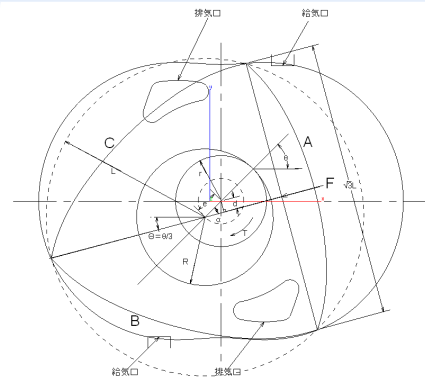


図3

θ	0	45	90	135	180	225	270	315	360	405	450	495	540	
ϕ	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	
空房C	定圧吸気(高圧)				定圧排気(低圧)				定圧吸気(高圧)					
空房B														
空房A	1	2			3	4							1	2



容積型エンジンの利点



- θ : エクセントリック軸角(クランク角)
= ローター公転角度 [rad][deg]
- r : エクセントリック軸半径 [rad][deg]
- n : エクセントリック軸回転数 [rpm]
- Θ : ローター自転角度 (= $\square/3$) [rad][deg]
- R : ローター内輪半径 (= $3r/2$) [m]
- L : ローター外接円半径 (= $7r/2$) [m]
- h : ケーシング奥行(高さ) [m]
- e : 偏芯量 (= $R-r$) [m]
- d : 回転モーメントの腕の長さ(= $e \sin \alpha = e \sin(\theta - \theta/3) = e \sin(2\theta/3)$) [m]

トルクと仕事率

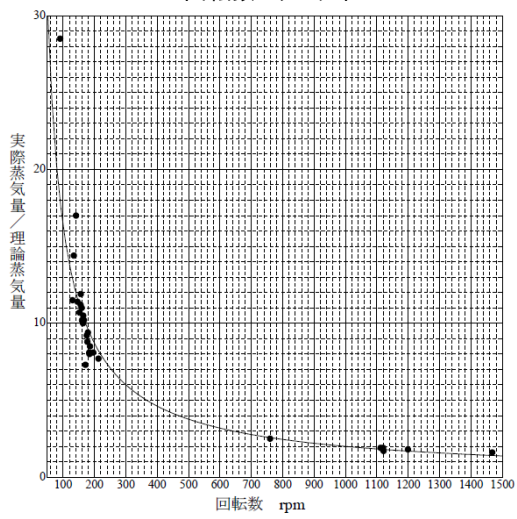
図3のように、空房A,B,Cのいずれか1室が交互に排気側に通じた低圧室となるため、ローターには常に合力が働き、偏心したエクセントリック軸にトルクQが加わる。Qは θ をパラメータとして、

$$Q = h \cdot \Delta p \cdot \sqrt{3} L (R - r) \cdot \sin(2\tilde{\theta} / 3) = (hr^2 \Delta p) \cdot \frac{\sqrt{3} L}{r} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \cdot \sin(2\tilde{\theta} / 3)$$



容積型エンジンの利点

回転数とリーク率



熱仕事効率は機械効率と消費蒸気量により決まる。

回転数と消費蒸気量の関係をシュミレーションして変化量を示すグラフを作成した

実測値は点でプロットして表現されている。

当初の試算通りの関係が成立しているので、エンジンの回転数は1000回転以上が好ましいと判断した。



熱仕事効率

Working fluid: water

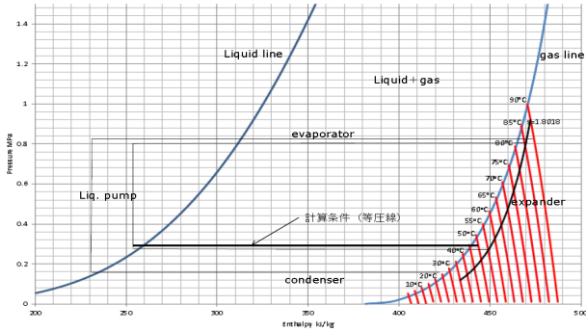
Rotary Heat Engine Simulator

Feed water temp. at evaporator (°C)	Boiling temp. at atmosphere (°C)	Engine inlet steam temp. (°C)	Volume of working chamber (cm ³)	Theoretical steam flow (g/s)	Actual steam flow (g/s)
95	100	140	291	9.53	10.25
Enthalpy of feed water (J/g)		Enthalpy of engine inlet steam (J/g)	Specific density of engine inlet steam (g/cm ³)	Rotating speed of drive shaft (rpm)	
397.0		2,732.6	0.001964	1,000.6	
Engine outlet steam pressure (kPa-abs)		Engine inlet steam pressure (kPa-abs)		Rotating speed of drive shaft (rps)	Rotating speed of rotor (rps)
83.9		361.0		16.68	5.56
Heat input (W)					
23,931.1					
Pressure difference between engine inlet and outlet (kPa)	Produced mechanical work per one rotation of drive shaft (Nm)				
277.1	80.6				
Theoretical torque (Nm)	Actual torque (Nm)	Mechanical loss, estimated (%)			Gas leak (%)
12.83	10.91	15.00			7.50
Produced electricity (W)		Heat efficiency (%)			
1,142.9		4.78			



熱交換器の選定

R245fa P-H



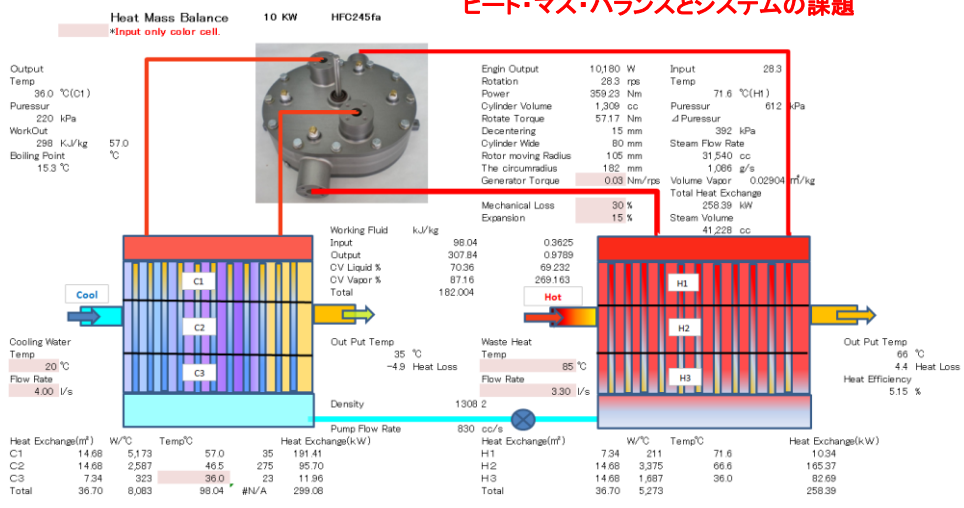
DUTY REQUIREMENTS

Heat load	kW	Side 1	298.18	Side 2
Inlet vapor quality		0.00		
Outlet vapor quality		1.00		
Inlet temperature	°C	40.00		90.00
Evaporation temperature (dew)	°C	63.00		
Superheating	K	5.00		
Outlet temperature	°C	68.00		60.62
Flow rate	l	1.467 kg/s		2.500 l/s
- Inlet vapor	kg/s	0.0000		
Fluid vaporized	kg/s	1.467		
Max. pressure drop	kPa	50.0		50.0



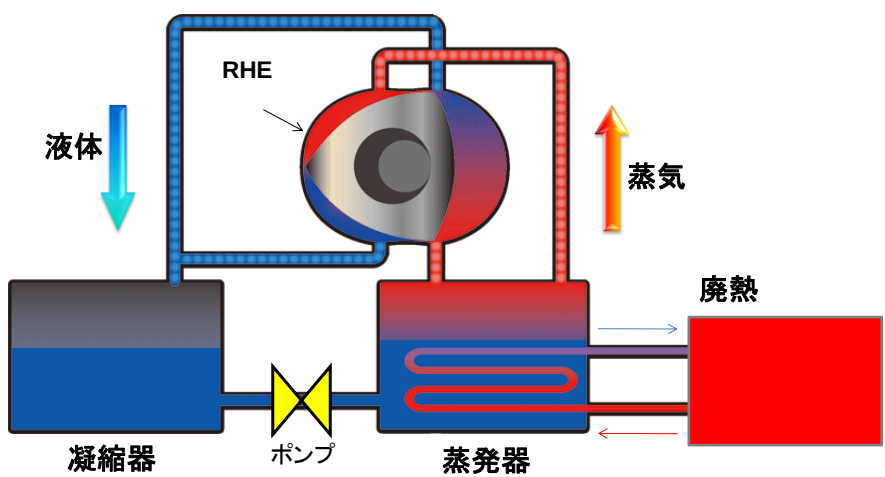
ヒートマスバランス

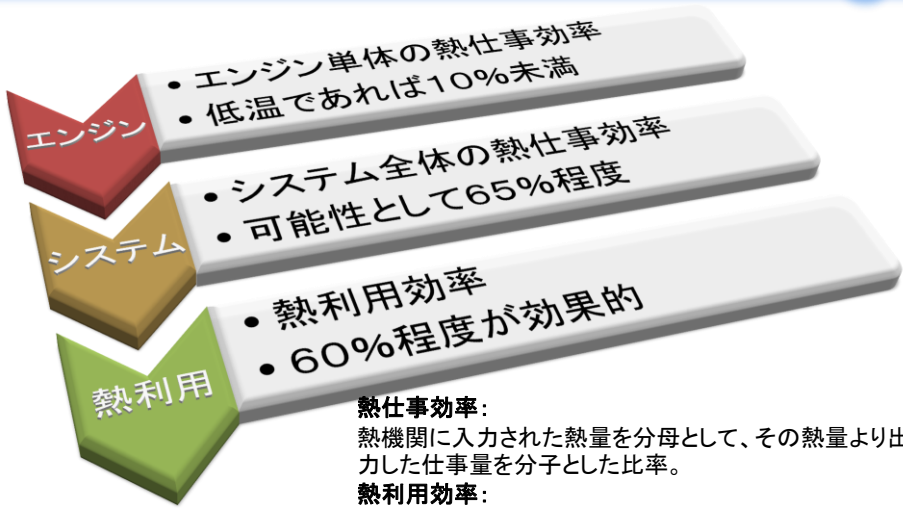
ヒート・マス・バランスとシステムの課題



ロータリー熱エンジン

ロータリー熱エンジン
(RHE)システム構成

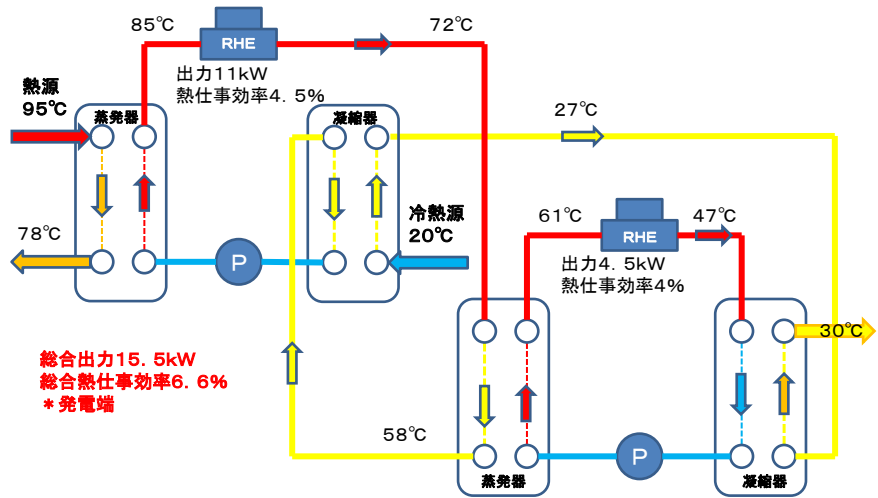




熱仕事効率:
熱機関に入力された熱量を分母として、その熱量より出力した仕事量を分子とした比率。

熱利用効率:
入力された熱の温度と環境温度との差を分母として、初期入力温度と最終段で排出される温度との差を分子とした比率。

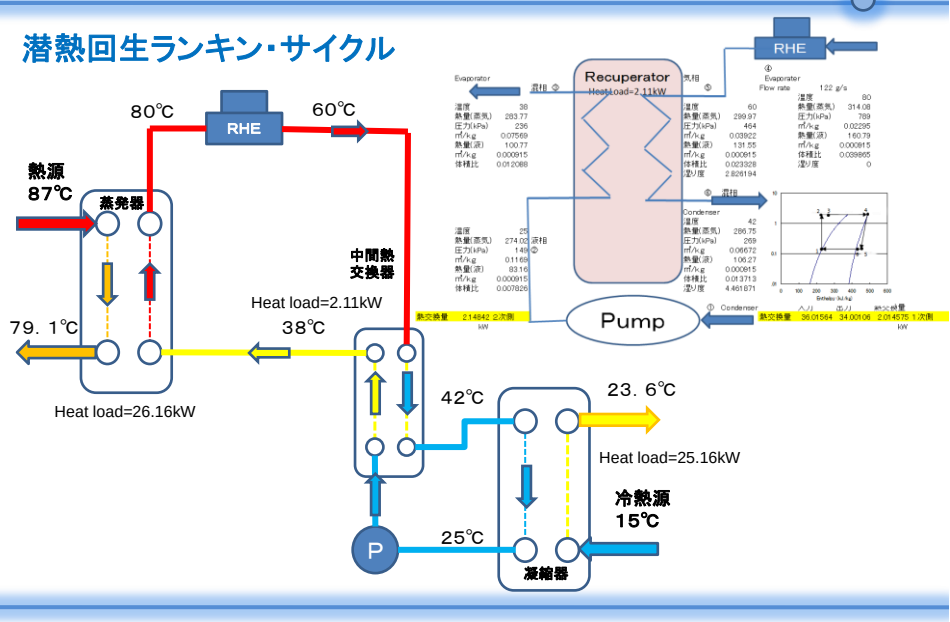
コンバインド・サイクル



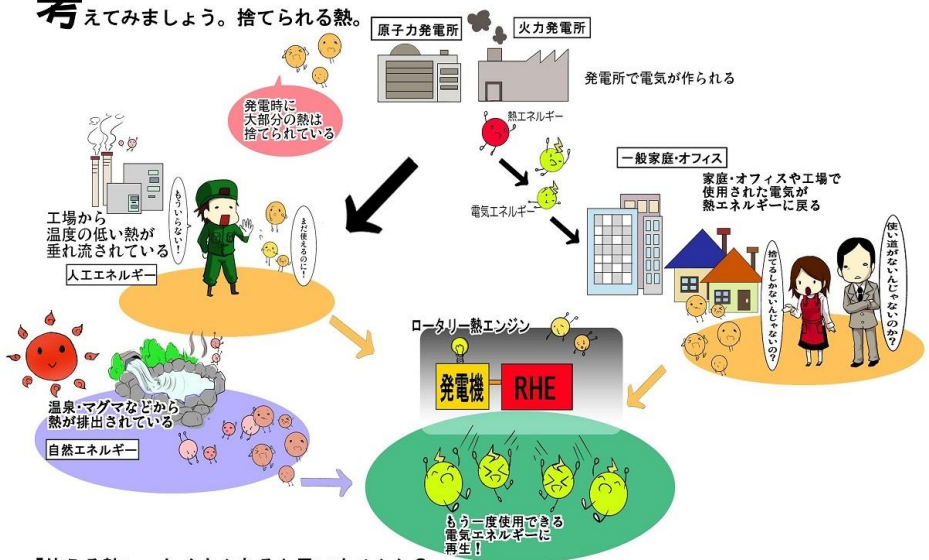


複合サイクル

潜熱回生ランキン・サイクル



考えてみましょう。捨てられる熱。



「使える熱」。たくさんあると思いませんか？
あなたの身の回りではあまり実感できないことも、確実に社会の中で関わっていることなのです。



蓄熱による発電(エネルギーの価値)



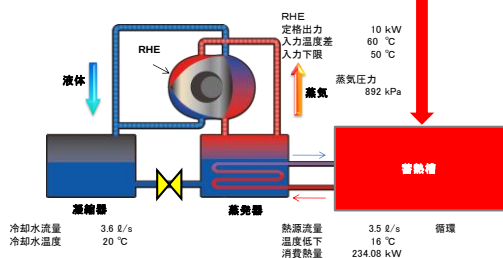
工場廃熱
温度 85 °C
流量 3.30 t/s
排出時間 20 h
熱量 243.3 kW
排湯温度 67 °C
湯量 3.3 t/s
排湯総量 237.6 m³

※水色のセルが入力可能です。

ドレン水圧力 0.0 kPaG
59.4 kcal/s

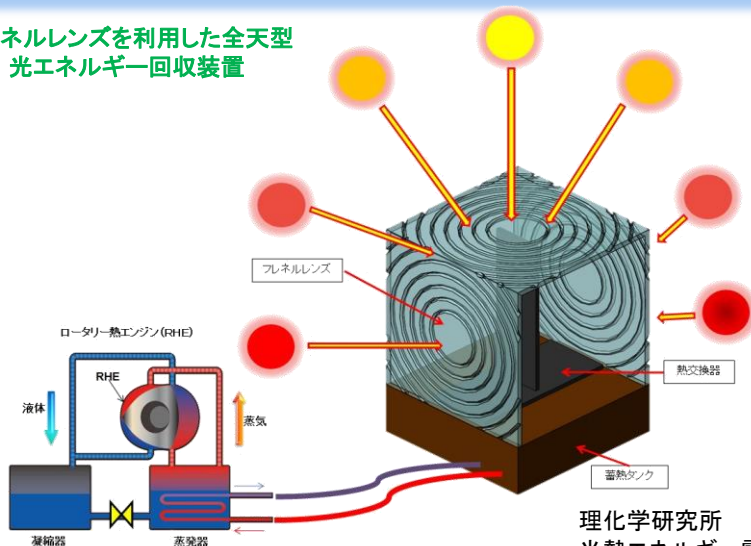
環境条件
気温 25 °C
水温 20 °C

発電能力	時間	発電総量	発電総電力	導入台数
20	10.66 kWh平均	8.74 kW		
蓄熱運転時	2.53	5.13 kWh平均	4.21 kW	
合計	22.53	10.04 kWh平均	8.24 kW	1



太陽光熱エネルギーの電力化

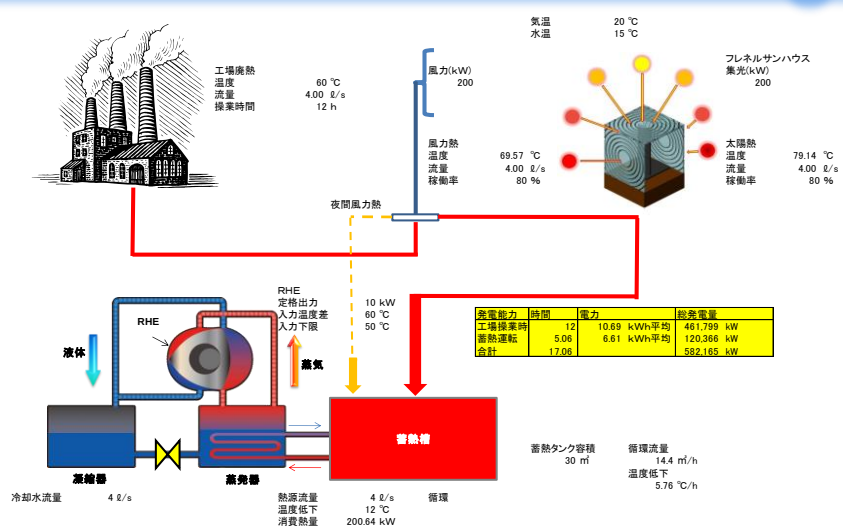
フレネルレンズを利用した全天型
光エネルギー回収装置



理化学研究所
光熱エネルギー電力化研究
チーム



熱資源の複合利用と環境改善



ご清聴ありがとうございました。

独立行政法人理化学研究所
光熱エネルギー電力化研究チーム
東 謙治