

博士論文

変動性再生可能エネルギーを調整するための  
蓄熱技術を導入した熱電供給システムの設計

山木 亜由美

# 目次

---

第 1 章 序論.....	1
1.1. カーボンニュートラルを実現するための変動性再エネ.....	1
1.2. 蓄エネルギー技術の種類と特徴.....	2
1.3. 製造業の持続可能性.....	7
1.4. 製造業における再エネの利用に関する既往の 研究.....	10
1.5. 研究課題.....	11
1.6. 目的と本論文の構成.....	13
第 2 章 変動性再エネを調整するための 蓄熱技術を導入した熱電供給システム.....	16
2.1. 蓄熱技術と変動性再エネの導入検討をするための対象の選択.....	16
2.1.1. 変動性再エネの導入ポテンシャルの偏在性.....	16
2.1.2. 製造業の業種別の特徴.....	19
2.1.3. 製造業によるエネルギー利用.....	27
2.2. 蓄熱技術を導入した熱電供給システム.....	30
2.2.1. 熱電供給システムの代替案.....	30
2.2.2. 概念実証の要件定義.....	33
第 3 章 製紙工場における蓄熱技術と風力を導入した熱電供給システム	34
3.1. 概要：蓄熱技術を導入した製紙工場.....	34
3.2. 蓄熱技術を導入した製紙工場のモデル構築.....	35
3.2.1. 蓄熱技術と風力を導入した製紙工場のエネルギー需給フロー.....	35
3.2.2. 蓄熱技術と風力を導入した製紙工場のモデル.....	38
3.2.3. エネルギー収支シミュレーションで用いた数式.....	47
3.2.4. シミュレーション条件および導入シナリオの設定.....	52
3.3. 製紙工場における蓄熱技術と風力の導入評価.....	56

3.3.1.	エネルギー収支のシミュレーション .....	56
3.3.2.	蓄熱技術と風力の導入規模の影響評価 .....	57
3.3.3.	製紙工場外に風力熱発電を導入した場合 .....	58
3.3.4.	導入シナリオの比較 .....	60
3.3.5.	売電と売熱の両方を行った場合 .....	64
3.3.6.	地域の太陽光を利用するための出力調整 .....	65
3.4.	まとめ：製紙工場で期待される風力の利用 .....	66
 <b>第4章 日本の各製紙工場における蓄熱技術と再エネを導入した熱電供給システム .....</b>		
		<b>68</b>
4.1.	概要：工場や地域の特性を考慮した熱電供給システム .....	68
4.2.	工場や地域の特性を考慮するための条件設定 .....	69
4.2.1.	対象とした製紙工場の特性 .....	69
4.2.2.	シミュレーション条件の設定 .....	73
4.3.	日本の各製紙工場における蓄熱技術と再エネの導入評価 .....	74
4.3.1.	各製紙工場に蓄熱技術と風力を導入した場合 .....	74
4.3.2.	代替電源の変更と木質バイオマスの導入による効果 .....	78
4.3.3.	製紙工場の特徴による再エネの導入効果の違い .....	79
4.4.	蓄熱技術の導入量とエネルギー供給力 .....	86
 <b>第5章 変動性再エネを導入した熱電供給 システムの設計 .....</b>		
		<b>90</b>
5.1.	変動性再エネを調整するための蓄エネルギー 技術 .....	90
5.1.1.	蓄エネルギー技術比較のためのモデル .....	90
5.1.2.	蓄エネルギー技術の導入評価 .....	93
5.2.	熱電供給システムのエネルギー供給力と地域のエネルギー需要 .....	99
5.3.	変動性再エネを導入した熱電供給システムの ある工場と地域の在り方	
		101
 <b>第6章 結論と今後の展望 .....</b>		
		<b>105</b>
6.1.	結論 .....	105
6.2.	今後の展望 .....	109

参考文献.....	111
論文業績.....	122
Nomenclature.....	123
Appendix .....	129



# 第1章 序論

---

## 1.1.カーボンニュートラルを実現するための変動性 再エネ

持続可能な社会の実現に向け、再生可能エネルギー（再エネ）の導入量は拡大しており、Figure 1-1 に示したように太陽光や風力などの変動性再生可能エネルギー（変動性再エネ、VRE）の割合も増加している[1]。再エネによる発電技術の急速な導入拡大により発電コストが下がっており、中には最も安価な石炭火力発電よりもコストが低下した技術もある[2]。日本でも再エネの導入は加速しており、特に 2012 年 7 月以降は太陽光発電の設置が急速に進んでいる[3]。再エネの導入は環境問題への対応以外に、発電コスト低減による経済的メリットの追求、デジタル技術などの新産業の創造、多発する自然災害を踏まえた電力供給システムの強靱化、再エネを活用した地域経済の活性化など、様々な目的のために導入が進められている[4]。

変動性再エネによる発電は季節や時間、気象による影響を受けるため、断続的な発電となり電力の安定供給には課題がある[5]。変動性再エネ由来の電力供給量が需要を大きく上回ると電力の需給バランスが崩れ、電力系統全体の出力や周波数が不安定になり、大規模な停電が起こる可能性があるため、変動性再エネによる発電量の出力抑制が行われる。日本では、九州地方で、2015 年での離島を皮切りに、2018 年からは全域で出力抑制が実施されている[6]。変動性再エネの変動性に対応するため、出力抑制以外にも様々な技術が検討されており[7]、電力系統の連系強化[7]、化石燃料やバイオマス由来の火力発電の出力制御[7, 8]、デマンドレスポンス（DR）[9]、蓄エネルギー（蓄エネ）[7, 10]といった対策が挙げられる。

日本では国単位の対策として、①化石燃料由来の火力発電の出力抑制、揚水発電の利用、②連系線による他地域への送電、③バイオマスの出力抑制、④太陽光・風力の出力制御、⑤水力、原子力、地熱といった長期固定電源の出力抑制の順で制御が既に行われ

ている[11]。ただし、バイオマスを用いた制御は、変動性再エネの出力変動を緩和するのに機能する電源であることがわかってはいるが[8]、利用するバイオマス資源量は持続可能なレベルに制限する必要がある。例えば、木質バイオマスは、持続可能な林業計画のもとで利用される必要がある[12]。

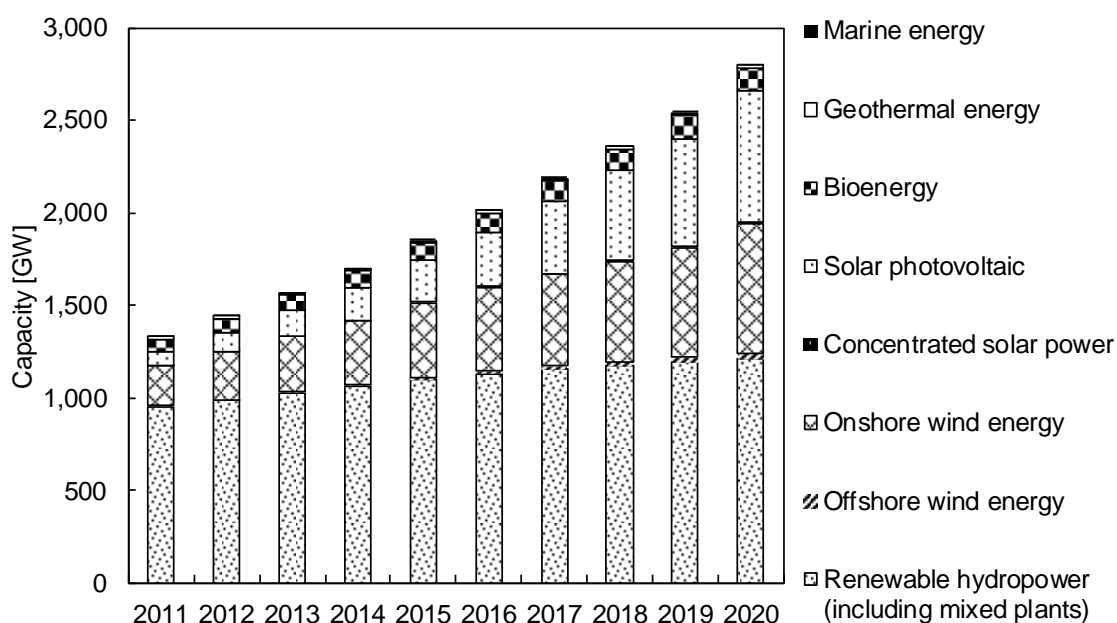


Figure 1-1. Capacity of renewable energy in the world [1].

国単位での対策の一方で、再エネ由来の発電は従来型の発電に比べ小規模になることが多いため、DR や蓄エネといった取り組みが求められる[13]。DR は、時間帯別の電気料金設定や、電力の使用抑制指示に応じて、エネルギー需要家による電力消費パターンを変化させ、電力需要のピーク時の電力消費を抑えたり、電力消費の時間帯を移動させたりする仕組みである[14]。しかし、製造業では製品の需要に応じて生産スケジュールが決まるため、家庭部門や業務部門などの他部門に比べ、DR を導入することは困難である[15]。蓄エネ技術については、様々な種類が報告されており、詳細は 1.2 節で述べることとする。

## 1.2.蓄エネルギー技術の種類と特徴

蓄エネ技術は、エネルギー供給の多い時にエネルギーを吸収し一定期間貯蔵した後、需要に合わせてエネルギーを供給するものである。これによりエネルギーの時間的、地

理的ギャップを埋めることが可能となる。蓄エネの方法は数多くあり[10, 16]、貯蔵されるエネルギーの形態に応じて、機械的（揚水発電、圧縮空気貯蔵、フライホイール蓄電）、電気化学的（化学電池、レドックスフロー電池）、電氣的（キャパシタ、スーパーキャパシタ、超電導電力貯蔵）、化学的（水素貯蔵）、蓄熱に分類される[10]。本研究では、製造業で再エネを利用するために蓄エネの導入を検討するため、大容量のエネルギー貯蔵が可能な技術について比較する。Table 1-1 に 20 MW 以上の蓄エネ技術[17]の比較を示す。以下に個々の技術について述べる。

Table 1-1. Energy storage technologies.

Technology	Materials used in energy storage system	GHG intensity	Abiotic resource depletion (ARD)  kg- Sbeq/kWh	Energy capital cost  \$/kWh	Power capital cost  \$/kW	Suitable storage duration [10]
Pumped storage hydropower (PSH) system				5-100 [10]	2000- 4300 [10]	hours- months
Compressed air energy storage (CAES)				2-120 [10]	400- 1000 [10]	hours- months
Flywheels				1000- 14000 [10]	250-350 [10]	secs-mins

Table 1-1. Energy storage technologies. (continued)

Li-ion battery	LiCoO <sub>2</sub> 、	396.5 kg-	6.8×10 <sup>-3</sup>	600-3800	900-	mins-days
	LiNiO <sub>2</sub> 、	CO <sub>2</sub> eq/kWh	[19]	[10]	4000	
	LiFePO <sub>4</sub> 、	[19]			[10]	
	LiPF <sub>6</sub> [18]					
Lead-acid battery	PbO <sub>2</sub> 、			50-400	200-600	mins-days
	Pb、 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			[10]	[10]	
	[10]					
Flow battery	V、 ZnBr			150-1000	600-	hours-
	[20]			[10]	2500	
					[10]	months
Hydrogen		0.97 kg-			500-750	hours-
		CO <sub>2</sub> eq/kgH <sub>2</sub>			[22]	
		[21]				months
Molten salt (thermal)	NaNO <sub>3</sub> 、	33.4 kg-	1.5×10 <sup>-4</sup>	10 [25,	100-400	mins-
	KNO <sub>3</sub> [23]	CO <sub>2</sub> eq/kWh	[24]	26]	[10]	
		[24]				

揚水発電（PSH）は、導入の長い歴史により技術的成熟度が高く、世界の設置容量の約 99%を占める蓄エネ技術である[22]。水力式発電所を挟んで上下に水を貯えるための調整池を設置し、発電コストが安い時や再エネの発電量が多い時に水を上部調整池に汲み上げ、電力需要の大きい時に下部調整池に水を流して発電する[10]。上下の関係になるように調整池を 2 つ設置する必要がある、地形的に適切な設置場所は限定されるため[27]、工場の近くに適地があるとは限らず、製造業で利用するために新たに設置することは困難である。

圧縮空気貯蔵（CAES）は、電力需要の少ない時に地下空洞や海底、タンクなどの貯蔵設備に空気を送り込み高圧空気の形で貯蔵し、電力需要が多くなると、貯蔵された圧縮空気が放出され発電機を回転させて発電する仕組みである[17]。地下空洞や海底などを利用する場合は適切な岩盤などが必要で地形的に設置場所が限られる。

フライホイール蓄電は、電力を、真空中に保たれた格納容器の中に設置されたフライホイール（弾み車）の回転エネルギーに変換して蓄えるシステムである[28]。真空中にフライホイールを設置するのは空気抵抗によるエネルギー損失を低減するためである。高速の充放電が可能で応答速度が速いことが特徴だが、長期的なエネルギー貯蔵には適していない（Table 1-1 参照）。

化学電池は、内部の電気化学反応によって電気を起こすもので、繰り返し充放電可能なものを二次電池といい、再エネによって発電した電力を蓄電するためにも使用される。各セルは陽極と陰極の2種類の電極と電解質によって構成されており、電気エネルギーと化学エネルギーを双方向に変換することで充放電を行う。二次電池は様々な種類のもので報告されており、電極など電池で用いられる材料も様々である（例えば[29, 30]）。リチウムイオン電池は、正極は  $\text{LiCoO}_2$  や  $\text{LiNiO}_2$ 、 $\text{LiFePO}_4$ 、負極はカーボン、電解質は  $\text{LiPF}_6$  などのリチウム塩を有機溶媒に溶解したものが用いられる[18]。鉛蓄電池は、最も広く用いられている二次電池で、正極が  $\text{PbO}_2$ 、負極は  $\text{Pb}$ 、電解液は硫酸が使用されている[10]。

レドックスフロー電池も二次電池の一種である。電池セルと外部にある電解液タンクの間を、価数の変化する金属イオンを含んだ電解液が循環し、各電極で金属イオンが酸化還元反応を起こすことで充放電を行う[20]。酸化還元物質としては、バナジウムや亜鉛-臭素などが用いられる。

水素は、水や化石燃料、バイオマスなど様々な原料から、熱分解、電気分解などのプロセスにより製造可能である[31]。貯蔵方法は、高圧タンク、液化、水素吸蔵合金や、アンモニア、メチルシクロヘキサン（MCH）といった水素化化合物に変換する方法がある[32]。水素の利用方法としては、水の電気分解の逆反応を用いた燃料電池や水素ガスタービンが挙げられる[32]。燃料電池は、電気と熱を取り出すことができ、代表的な種類として、リン酸形燃料電池（PAFC）、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）、固体酸化物形燃料電池（SOFC）、固体高分子形燃料電池（PEFC）がある[33]。水素を用いた発電技術のライフサイクルにおける  $\text{CO}_2$  排出量の評価として、海外の再エネで水素を製造し、日本での発電に利用する場合の評価がされており、エネルギーキャリアの種類やサプライチェーンによっては、再エネ起源の水素を用いるより、天然ガスと CCS（Carbon capture and storage）の組み合わせの方が、 $\text{CO}_2$  排出量が少なくなる場合がある[34]。特に、水素の液化、MCH 脱水素、アンモニア製造による  $\text{CO}_2$  排出量が大きいため、これらのプロセスでの再エネの利用や CCS との組み合わせが  $\text{CO}_2$  削減に有効であることが示唆された。

蓄熱技術（Thermal Energy Storage: TES）は、熱エネルギーを、顕熱、潜熱、化学蓄熱の形で貯蔵する方法である。大規模な蓄熱システムとしては、主に太陽熱発電（CSP）との組み合わせで用いられている[23]。CSP では、集光・集熱部分で太陽光から変換された熱を熱媒体に伝え、熱媒体の持つ熱を利用してタービンで発電し、熱供給量に対して需要が少ないときは蓄熱する[35]。商業用の CSP での蓄熱材料は主に熔融塩が用いられており、その公称温度は低温タンクで 292 °C、高温タンクで 386～565 °C となっている[36]。CSP 以外に、風力と組み合わせた風力熱発電が提案されており、風力-熱変換器（WEC<sub>th</sub>）で風力により発生した回転エネルギーを熱に変換し、得られた熱は CSP と同様にタービンでの発電に利用する[37]。また、変動性再エネ由来の電力を熱に変換して蓄熱し、需要に応じて発電する技術の組み合わせは Carnot Battery と呼ばれ[38]、Carnot Batteries と名付けられたプロジェクトでは、大規模な蓄エネルギーシステムを経済的かつ環境に配慮した方法での開発が始められた[39]。

蓄熱技術と蒸気タービンによる発電を組み合わせた蓄熱発電は、直接電気として出力できる電池に比べ、蓄熱した熱で蒸気を生成してから発電するため低効率ではあるが、蓄熱材料のコストが電池より安く、電池システムより蓄熱発電の方が低コストであることがわかっており[40]、さらなる低コスト化を目指して様々な蓄熱材料が開発されている[41]。硝酸塩の熔融塩を用いた 2 タンク型の蓄熱は、太陽熱発電のために商業化され、現在では成熟技術であるといえる。熔融塩の他には、碎石やコンクリート、シリコン潜熱などを蓄熱材料としたプロジェクトが進められている。碎石やコンクリートは、1 タンク式で蓄熱材料の中で温度勾配を生じさせるサーモクラインで使用され、蓄熱材料は低コストだが容量が必要であり、設備は大型になりやすいため、土地代や建物代が安価な地域に適している。蓄熱材料ごとの LCA 評価では、熔融塩よりもコンクリートの方が蓄熱材料の温度が低いため蓄熱密度は小さくなるが、設備の耐熱性能を下げることで、蓄熱システムの構造を単純化できるため、1 kWh 当たりの環境影響は小さくなる[42]。

製造業で用いるためには、貯蔵に地形的な制約のいらない二次電池、水素貯蔵、蓄熱技術が候補になると考えられる。二次電池は、数時間程度のエネルギー貯蔵が適切とされ、水素貯蔵と蓄熱技術は数か月のエネルギー貯蔵が可能である。製造業では、時間単位のエネルギー変動に加え、製造装置のメンテナンスのための数日のライン休止もあり、エネルギー需要の調整は数時間程度では不十分な可能性が高い。また、二次電池は希少金属が必要であり、資源消費量も多い[19]。そのため、製造業で再エネの変動を調整するために大容量の二次電池を導入するのは不向きと考えられる。水素は利用するために

燃料電池や水素ガスタービンなどの設備を導入する必要がある、これらは現在開発段階の技術でもあるためコスト高になるという課題がある。蓄熱システムは、蓄熱媒体である熔融塩から熱交換によって高圧蒸気を生成することができるため、自家発電用の蒸気タービンのある工場ではそれをそのまま利用することが可能である。蓄熱技術は成熟した技術の組み合わせで運用可能な技術であり、現在の製造業でもスムーズに導入可能であると考えられる。

### 1.3. 製造業の持続可能性

製造業は、原材料を加工して製品を生産し、生活に必要なものを提供する産業であり、総務省では、「製造業とは、主として次の業務を行う事業所をいう。(1) 新たな製品の製造加工を行う事業所であること。(2) 新たな製品を主として卸売する事業所であること。」と定義されている[43]。製品を生産するためには、製造設備や原材料などを必要とするため、雇用面や生産面での波及効果が大きい。「持続可能な開発目標 (SDGs)」で目指す、持続可能でよりよい社会を実現する[44]ために持続可能な製造業になることが必要である。特に、環境悪化を防ぎ、環境に配慮した技術や産業プロセスを導入拡大しながら、経済成長を維持することが求められている。

製造業では、製品を製造する際に多量のエネルギーを必要とするが、エネルギー源として化石燃料を使用することが多いため、温室効果ガス (GHG) 排出量も多くなっている。Figure 1-2 に、世界と日本における GHG 排出量の業界別の内訳を示す[45, 46]。2019 年の世界の年間の GHG 排出量は 31.9 Gt-CO<sub>2</sub>eq であり、発電・熱発生に伴うエネルギー起源の GHG 排出量を電力・熱の消費量に応じて各部門に配分した場合、製造業 (Industry) が最大で 38.6% を占め、次いでビル (Building) 27.3%、運輸 (Transport) 26.6% となっている[45]。日本での年間の GHG 総排出量は 1.2 Gt-CO<sub>2</sub>eq であり、製造業の占める割合は、エネルギー起源の産業部門 (工場等) が 37.5% (電気・熱配分後) で、非エネルギー起源の工業プロセス及び製品の使用を合わせると 39.0% となり、他分野に比べ最も高い割合である[46]。エネルギー消費量は年間 12.9 EJ であり、そのうちの 43.5% を製造業が占めた[47]。製造業でのエネルギー利用は、電力だけでなく熱を利用する分野も多いことが特徴である[48]。

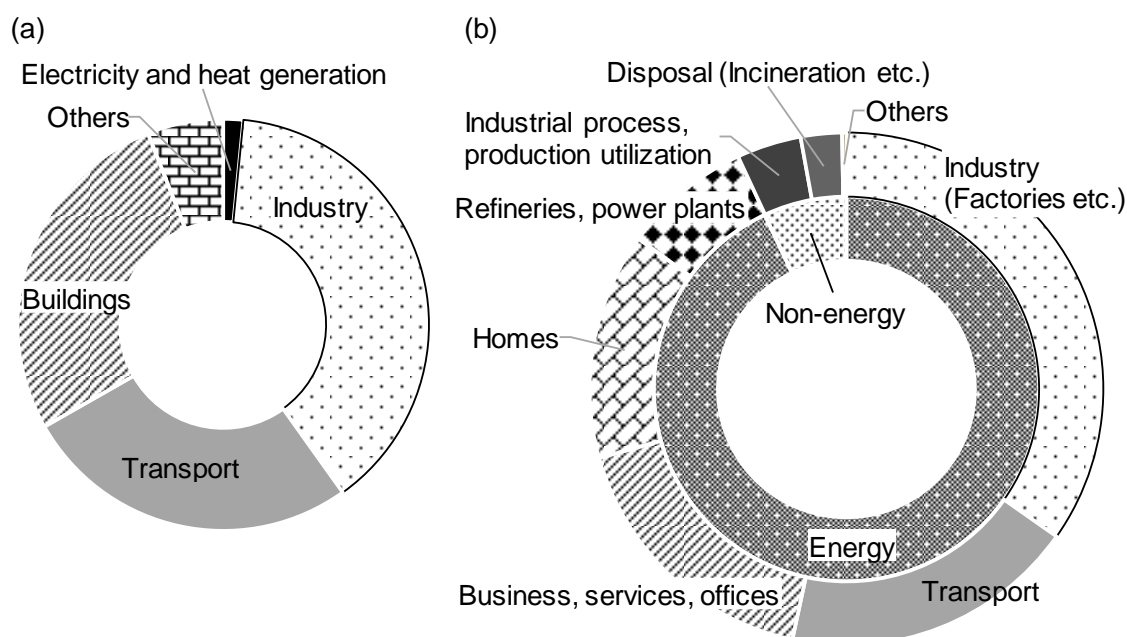


Figure 1-2. GHG emissions by sector, 2019. (a) Global [45]. (b) Japan [46].

持続可能な社会の構築のため、カーボンニュートラルを宣言した国や地域が増加している。2021年1月時点で日本を含む124か国と1地域が2050年までのカーボンニュートラルの実現を宣言している[49]。カーボンニュートラルとは、GHGの排出量と吸収量を均衡させ、全体としてGHG排出量をゼロにすることである。カーボンニュートラルを実現するためには、省エネルギーやGHG排出原単位の低減、電化などの対策によりGHG排出量を削減し、脱炭素化できない場合や、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）削減に膨大なコストがかかる場合に、植物の光合成で大気中のCO<sub>2</sub>を吸収するための植林や、CO<sub>2</sub>を回収して貯留や利用するCCS (Carbon capture and storage) やCCU (Carbon capture and utilization) の技術を用いることで、大気中のCO<sub>2</sub>を減少させる必要がある。エネルギー起源のGHG排出原単位を削減するため、製造業に限らず、企業の化石燃料消費量を削減し、再エネの導入量を増加する企業は増加している。企業が事業の使用電力をすべて再エネで賄うことを目指す国際的なイニシアティブとして、2017年「世界自然エネルギー100%プラットフォーム（Global 100% Renewable Energy Platform）」が設立され[50]、Figure 1-3に示すように、様々な分野の企業が参加をしている[51]。日本では、建設業、電気機器、小売業が多いが、世界的には金融業が最も多く、製造業の参加は限られている。



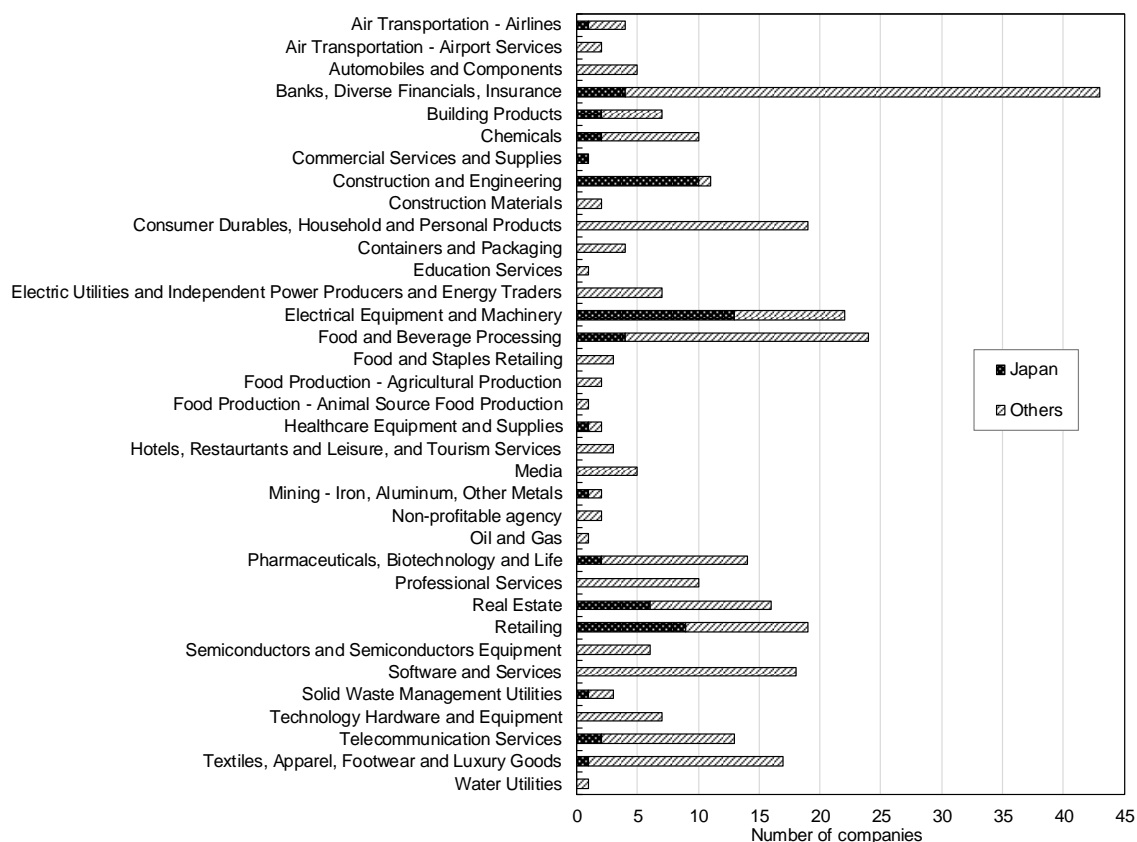


Figure 1-3. Number of RE100 members [51].

製造業は、製品により製造プロセスが異なるため分野ごとでの対策が必要だが、化石燃料由来のエネルギーの利用による GHG 排出量を削減することは製造業全体の課題といえる。また、新型コロナウイルス感染症の流行により、新しい生活様式の刷新がある一方で、新たなリスクが浮き彫りになり、日本の製造業の生き残りには、レジリエンス、グリーン、デジタルの観点からの経営戦略の構築が求められるようになった[52]。そのため、製造業でもレジリエンスでグリーンなエネルギー利用が必要であり、エネルギーの地産地消を目指し、再エネの導入量を増加させていくことが求められる。

## 1.4.製造業における再エネの利用に関する既往の研究

製造業でのカーボンニュートラルの実現に向けて GHG 排出量を削減するための対策として、様々な検討が行われている。パーム油産業では、パーム油の製造プロセスでは化学的酸素要求量 (chemical oxygen demand: COD) や生物化学的酸素要求量 (biochemical oxygen demand: BOD) が多く含まれる廃水 (palm oil mill effluent: POME) が発生するが、この POME からバイオメタンやバイオ水素などの再エネを生成する研究が行われている[53-55]。セメント製造では、セメント材料を化石燃料から代替するため、サトウキビから砂糖を製造した時の残渣を用いた実験検討[56]やライフサイクル評価 (LCA) [57]、産業廃棄物を用いた場合の燃焼プロセスのシミュレーション[58]などがされている。また、セメント製造のエネルギー供給源として、化石燃料から家庭の生ごみ由来の食品残渣に切り替えたときの操業における問題点のシミュレーションによる解析[59]や、作物残渣を使用した場合の LCA 評価[60]、変動性再エネである太陽熱を用いた実験で製造したセメントの品質評価も行われている[61]。製紙プロセスでは、エネルギー源として、バイオマス由来の燃料や電力を利用した場合の経済性評価[62]や技術的成熟度、市場の可能性などの評価[63]がされている。繊維工場や食料品製造工場での加熱プロセスに太陽熱を利用した検討では、実験による効率評価や化石燃料の消費量、経済性評価などがされている[64-67]。製薬工場では、系統電源から独立した太陽光発電と蓄電池を導入した時の LCA 評価[68]や、太陽光発電と風力発電、CHP を導入したときの経済性評価[69]が行われている。このように、製造業では様々な業種で、植物由来のバイオマスを原材料とする検討や、製造プロセスのエネルギー源として変動性再エネやバイオマスを用いた検討が行われている。

製造業のある地域全体で、環境負荷低減や地域の活性化を目指す取り組みとして、地理的に近接した複数の異なる産業が材料やエネルギー、水、副産物などを物理的に交換する「産業共生 (Industrial Symbiosis)」がある[70]。産業共生が実施された早期の代表的な地域として、デンマークの Kalundborg 地域が挙げられる[70]。Kalundborg では、エネルギーや副産物、水が、発電所や製油所、医薬品製造工場、ボード製造工場、浄水場などで相互利用されており、周辺地域に電力や熱を供給している[71]。Kalundborg の産業間のネットワークは、核となる企業を中心に互いのメリットのために 1960 年頃から自発的かつ個別的に始められ、徐々に形成されたものである。他地域にも同時期に産業

共生や、類似の要素を含む地域やプロジェクトが発生しており、それらも Kalundborg と同様に、自己組織化のための核を中心として、地域に根差したものが持続可能な形で実現してきた[72]。その他にもヨーロッパ諸国やアメリカ、中国などで産業共生プロジェクトが生まれ、Eco-industrial park 呼ばれる工業団地が形成されてきた[73, 74]。

現在の産業共生は、異なる製造業間で副産物や廃棄物を相互に交換される場合が多いが、地域資源である再エネを製造業で使用し、余剰に生成した蒸気および電力を周辺地域にも供給することも検討されている。製糖工場の副産物であるバガスを利用した CHP システムにおいて、地域で入手可能な木材由来バイオマスを組み合わせ、地域に売電および売熱をすることでエネルギーロスを削減できることがわかっている[75]。ただし、製糖工場の排熱を蓄熱輸送によって製糖工場と異なる場所で使用する検討では、蓄熱輸送による輸送能力には限界があることがわかっており[76]、熱は工場の近隣の地域で利用することが望ましい。地域と産業の共生を計画的に実施するためには、産業共生の計画者に加え、自治体や各事業者などのステークホルダーの協力が必要である[77]。今後、製造業でのカーボンニュートラルを実現するためには、地域の廃棄物やバイオマスだけでなく、変動性再エネなど、地域にある未利用な資源を利用することが必要となる。これまで以上に製造業と地域は密接に関わっていくことが求められると予想される。既に形成されてきた「共生」の形を基に、製造業と地域の在り方を見極める必要がある。

## 1.5. 研究課題

製造業でカーボンニュートラルを実現するためには、変動性再エネを蓄熱技術で調整することが有効と考えられ、製造業の製造プロセスと再エネ、蓄熱技術を組み合わせたエネルギーシステムが必要である。ただし、製造業の中には様々な分野があるため、再エネの導入をより効果的にするため対象を絞る必要がある。また、再エネは地域資源であるため、製造業の事業所のある地域でカーボンニュートラルを実現するために再エネを導入したエネルギーシステムを検討する必要がある。新しいエネルギーシステムの導入効果を評価するためのモデルを開発し、そのモデルを用いて、新しいエネルギーシステムの導入に適している工場や地域の特徴を明確にするために以下の研究に取り組む。

## **研究課題 i. 製造業によるエネルギー消費割合の高い地域でカーボンニュートラルを実現するための課題の抽出と検討対象の選択**

製造業には様々な分野があり、分野によっては既にバイオマスや水力といった再エネを主なエネルギー源として利用している業種がある一方で、化石燃料に依存している業種も多い。持続可能な製造業を実現するためには、化石燃料の消費量が多い業種でも、再エネの導入量を増加させ、製造業による GHG 排出量の削減が求められる。特に製造業は事業所単位で全国各地に存在しており、事業所ごとに対策する必要がある。限られた種類の再エネだけでなく、製造業によるエネルギー消費割合の高い地域でも入手可能な風力などの変動性のある変動性再エネも導入することで、再エネの導入量を増加させることが求められる。製造業の中で業種ごとの特徴を整理し、変動性再エネの導入量の増加を検討する対象を絞る必要がある。

## **研究課題 ii. カーボンニュートラルの実現に向けて変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムの代替案生成**

製造業で再エネを導入してカーボンニュートラルを実現するためには、従来の化石燃料の依存度が高いエネルギーシステムを変える必要がある。研究課題 i. で明らかにした製造業の特徴を活かしつつ、再エネの中でも変動性のある変動性再エネを有効利用するため、蓄熱技術を導入したシステムを検討する。工場周辺の地域にも再エネ由来のエネルギーを供給することで、工場と周辺地域でカーボンニュートラルを実現するための代替案として、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムを生成する。

## **研究課題 iii. 変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムの評価**

蓄熱技術や再エネの導入効果として、エネルギー供給力の向上やライフサイクル GHG (LC-GHG) の削減が期待される。しかし、これらの効果の程度は蓄熱技術や再エネの導入量によって異なるはずであり、場合によっては悪影響ばかりが出る可能性もある。研究課題 ii. で生成した熱電供給システムの概念実証として、蓄熱技術と再エネの導入評価をする必要がある。製紙工場を対象としたケーススタディを実施して、エネル

ギーシステムのモデルを構築し、工場のエネルギー収支のシミュレーションを行い、工場からの売電・売熱量や GHG 排出量について評価する。

#### **研究課題 iv. 特性の異なる工場や地域における蓄熱技術と再エネの導入評価**

ある特定の工場で蓄熱技術と再エネの導入効果を得られても、他の工場でも同様の効果が得られるとは限らない。より多くの工場で再エネの導入効果を得るため、研究課題 iii. で構築したモデルを用いて日本各地に存在する製紙工場を対象としたケーススタディを実施する。各工場における蓄熱技術や再エネの導入効果を評価することで、工場や地域の特性による違いを比較する必要がある。工場や地域の特性によって適した再エネの導入条件を見極める必要がある。

#### **研究課題 v. 工場や地域の特徴を活かした熱電供給システムの設計**

蓄熱技術を導入した熱電供給システムのエネルギー供給力は、工場と地域のエネルギー需要に見合ったものであることが求められる。また、蓄熱技術以外の蓄エネ技術として、蓄電池や水素貯蔵の導入プロジェクトが立ち上がっており[78, 79]、蓄熱技術以外の蓄エネ技術を導入検討することもあると考えられる。地域のエネルギー需要は、地域にある製造業の業種や、系統電源との併用、災害時のエネルギー供給の強靱化のために予備の供給力の確保、域外へのエネルギー移出といった、地域のエネルギー政策によって変わる。地域の再エネ供給力や、工場と地域のエネルギー需要を考慮して、蓄熱技術や再エネの導入量、熱電供給システムがエネルギーを供給する範囲を設計する必要がある。変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムが地域に根差したものになるように、工場と地域の在り方を考察する。

## **1.6. 目的と本論文の構成**

本研究では、製造業と地域がカーボンニュートラルを実現するための熱電供給システムを設計することを目的とする。全国に存在する事業所の周辺地域の熱電供給システムの代替案を生成し、生成した代替案の評価を行い、製造業と地域の在り方を明確化する。

本論文は全 6 章で構成され、Figure 1-4 に本論文の構成を示す。

第2章では、研究課題 i. の検討対象の選択と、研究課題 ii. の熱電供給システムの代替案を生成する。製造業の業種ごとの特徴を整理し、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの導入対象を選択する。選択した対象において、カーボンニュートラルを実現するための熱電供給システムの代替案を生成する。

第3章では、研究課題 iii. の取り組みとして、製紙工場を対象として、蓄熱技術と風力の導入評価をし、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証を行うためのモデルを構築する。第2章で生成した代替案を基に製紙工場の熱電供給システムのモデルを構築し、エネルギー収支のシミュレーションを実施する。蓄熱技術を導入した熱電供給システムからの売電・売熱量を求め、LCA を実施する。蓄熱技術と風力の導入条件を変えた導入シナリオ別の評価や、周辺地域に太陽光発電が導入されたことを想定した評価を行い、蓄熱技術と風力の導入効果を評価する。

第4章では、研究課題 iv. の特性の異なる工場や地域において、蓄熱技術と再エネを導入した熱電供給システムの導入評価をするため、日本各地の製紙工場に蓄熱技術と再エネを導入したケーススタディを実施する。第3章で構築したモデルにおいて、製紙工場や地域ごとの特性に合わせた変数を設定することで、蓄熱技術と再エネの導入評価を行う。工場や地域の特性によって適した再エネの導入条件を明確にする。また、蓄熱技術の導入量と熱電供給システムのエネルギー供給力の関係について分析する。

第5章では、研究課題 v. の取り組みとして、第3章で構築した蓄熱技術の導入評価のためのモデルを適用し、TES、蓄電池、水素貯蔵技術の比較を行い、工場や地域の特徴を活かした熱電供給システムを設計する。前章までに得られた結果から、地域のエネルギー需要に合わせた熱電供給システムのエネルギー供給力の設計方法を明確化する。また、変動性再エネを導入した熱電供給システムの導入フローや得られる効果をまとめ、工場と地域の在り方を設計する。

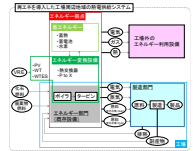
最後に、第6章で結論と今後の展望を述べる。

## 第1章: 序論

### 第2章: 変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システム

#### 【研究課題i, ii】

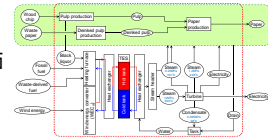
- ・検討対象の選択
- ・熱電供給システムの代替案生成



### 第3章: 製紙工場における蓄熱技術と風力を導入した熱電供給システム

#### 【研究課題iii】

- ・モデル構築
- ・蓄熱技術と風力の導入評価

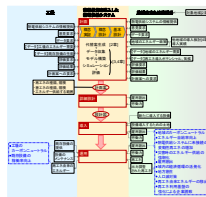


Energy, 205, (2020), 118056

### 第5章: 変動性再エネを導入した熱電供給システムの設計

#### 【研究課題v】

- ・蓄エネ技術の比較
- ・熱電供給システムの設計
- ・地域と工場の在り方の検討



### 第4章: 日本の各製紙工場における蓄熱技術と再エネを導入した熱電供給システム

#### 【研究課題iv】

- ・特性の異なる工場・地域での導入評価
- ・TESの導入量とエネルギー供給力の分析



Energy, under review

## 第6章: 結論と今後の展望

Figure 1-4. Structure of the thesis.

## 第2章 変動性再エネを調整するための 蓄熱技術を導入した熱電供給システム

---

### 2.1.蓄熱技術と変動性再エネの導入検討をするため の対象の選択

本節では、製造業で変動性再エネを導入する検討対象を絞るため、再エネと製造業の特徴を整理する。製造業は全国各地に事業所単位で存在しており、事業所のある地域でも入手可能な再エネを導入することが求められる。限られた種類の再エネだけでなく、風力などの変動性のある変動性再エネの導入検討が必要であり、製造業の中で業種ごとの特徴を整理し、変動性再エネの導入量の増加を検討する対象を選択する。

#### 2.1.1. 変動性再エネの導入ポテンシャルの偏在性

再エネは広く賦存しているが、存在量には地域によって偏在性がある。日本の再エネの導入ポテンシャルは、例えば環境省の「令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書」[80]に、太陽光、風力、中小水力、地熱による発電の都道府県別の導入ポテンシャルが推計されている。

Figure 2-1 に全国の都道府県別の再エネの導入ポテンシャルの量を示す[80]。日本全国の再エネの導入ポテンシャルの電力量の合計は、現在の日本の年間のエネルギー利用量である 12,942 PJ[81]より多いが、北海道や東北に偏在しており、エネルギーの大消費地である都市部とは距離が離れている。





中小水力は、導入ポテンシャルが 8.9 GW と推計されている。新潟県や岐阜県、長野県などの水資源が豊富な山間地域での導入ポテンシャルが高く、北海道地方や東北地方での導入ポテンシャルが高い太陽光や風力と比較して、中小水力は異なる地域に分布している。地方別に比較すると、中部地方が 39.6%、東北地方が 22.5%、九州地方が 11.5%となっている。

地熱発電は、150℃以上の蒸気フラッシュ発電、120～150℃のバイナリー発電、53～120℃の低温バイナリー発電に分けて推算されている。地熱の導入ポテンシャルの合計は 10.3 GW で、東北地方に 38.4%、中部地方に 18.8%、九州地方に 18.2%、北海道地方に 14.2%、関東地方に 10.4%と比較的全国に分布しているように見えるが、近畿地方、中国・四国地方は 1%未満であり偏在しているといえる。第 2 種および第 3 種特別地域にあたる国立・国定公園や、傾斜掘削を認めた場合、地熱発電の導入ポテンシャルは 27.5 GW 増加し、合計で 37.9 GW となる。

地域や工場単位でエネルギーの地産地消を目指す場合、面積当たりの導入ポテンシャルも重要である。都道府県の面積のデータ[83]から求めた面積当たりの再エネの導入ポテンシャルを **Figure 2-2** に示す。導入ポテンシャルの高い北海道は面積が広いいため、面積当たりの導入ポテンシャルは高くないことがわかる。面積当たりの導入ポテンシャルが最も高いのは千葉県の 16.5 MW/km<sup>2</sup>であり、茨城県の 16.2 MW/km<sup>2</sup>、佐賀県の 16.1 MW/km<sup>2</sup>と続く。最も少ないのは、高知県の 3.6 MW/km<sup>2</sup>であり、千葉県と比較して約 1/5 である。千葉県や茨城県はエネルギーの大消費地である関東地方にあり、再エネの効率的な利用を期待できる。

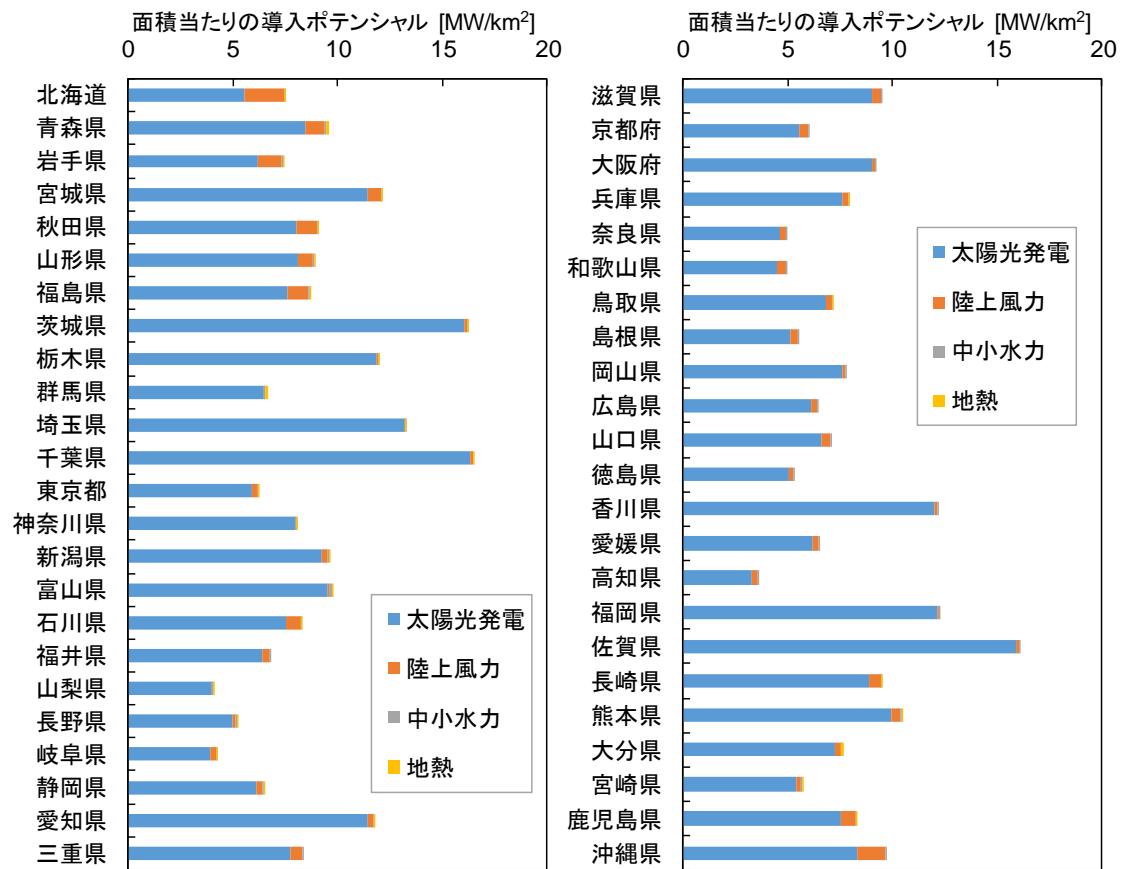


Figure 2-2. 面積当たりの再エネの導入ポテンシャル[80,83]

## 2.1.2. 製造業の業種別の特徴

製造業は原材料を加工して製品を製造・販売する産業であるが、製造される製品は様々である。総務省により規定された日本標準産業分類では、「大分類」に分類された「製造業」の下に、Table S 1 に示すように、「中分類」として 24 種類に分けられる[43]。

2019 年度に日本で排出された GHG は 1,213 Mt で、そのうち産業部門（工場等）から排出されたのは 386 Mt である[46]。Figure 2-3 に、製造業の業種別の GHG 排出量を示す[46]。業種全体で GHG 排出量が多いのは、鉄鋼業、石油化学工業、機械工業、窯業・土石製品製造業、製紙業の順であった。製造業は事業所ごとに生産を行っているため、GHG の削減は事業所単位で対策を行う必要がある。そこで、事業所数のデータ[84]から求めた事業所当たりの GHG 排出量を Figure 2-3 に合わせて示した。事業所当たりの GHG 排出量は、鉄鋼業、石油化学工業、製紙業、窯業・土石製品製造業、非鉄金属製造

業の順に多かった。鉄鋼業と石油化学工業は業種全体の GHG 排出量が多い上に、事業所数が限られているため、事業所当たり GHG 排出量も多くなった。一方、機械工業は事業所数が多く、事業所当たり GHG 排出量は少なかった。日本全体の GHG 排出量を効果的に削減するためには、事業所当たり GHG 排出量と業種全体の GHG 排出量の多かった鉄鋼業、石油化学工業、窯業・土石製品製造業、製紙業で GHG 削減のための対策をすることが必要だと言える。以下に、GHG 排出量の多い鉄鋼業、石油化学工業、窯業・土石製品製造業、製紙業の特徴を述べる。

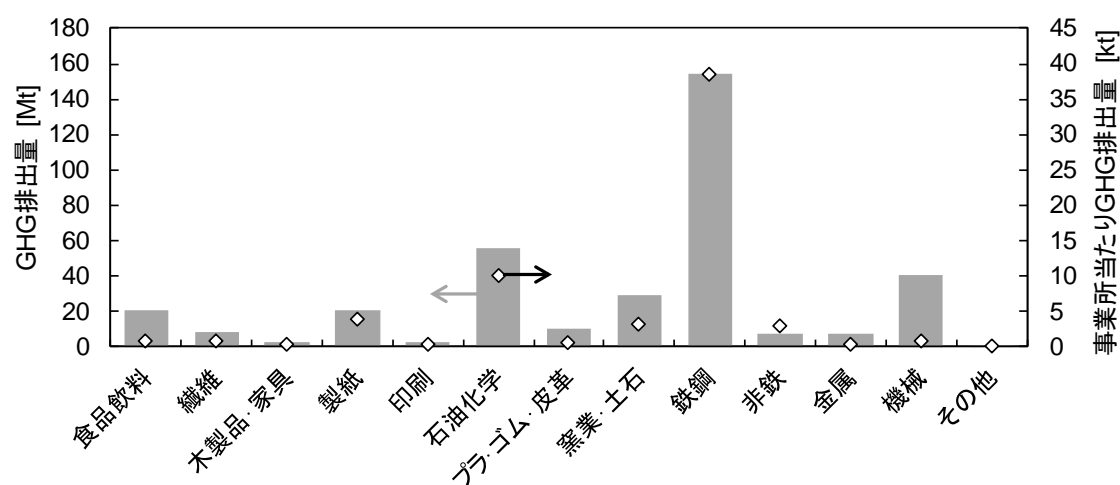


Figure 2-3. 業種別年間 GHG 排出量（電気・熱配分後）[46,84]

鉄鋼業の製造プロセスと製品を Figure 2-4 に示す[85, 86]。鉄鋼業には、鉄鉱石や原料炭などの原材料を高炉で溶解して鉄分を取り出し、製鋼で精錬し、鋼材製品を製造する高炉メーカーと、鉄スクラップを電気炉で溶解し精錬して製品を製造する電炉メーカーがある。製鉄所は、広さが 7~12 km<sup>2</sup> で、鉄鉱石などの輸入した原料の積み下ろしや製品の出荷に便利な海沿いに立地している[85]。

高炉は、日本では高さ 100 m 以上、内容積 5,000 m<sup>3</sup> 以上の世界最大級の設備が主流で、1 基当たり約 10 kt/d の銑鉄が生産されている[85]。高炉の上からは、石炭を十数時間乾留したコークスと、鉄鉱石を投入し、下からは熱風を吹き込む。コークスと熱風に含まれる酸素の反応により発生した CO や H<sub>2</sub> などは高温のため上昇気流となり、鉄鉱石を溶かしながら還元する（間接還元）。熔融した鉄は下へ流れ落ち、コークスとの接触によりさらに還元（直接還元）され、炉底の湯溜り部にたまり、高炉の底部にある出銑口から取り出される。熔融した銑鉄は、炭素分が約 4.5% と多く含まれており硬くて

もろいが、粘りのある強靱な鋼にするため、炭素やリンなどの不純物を除去する製鋼工場に運ばれる[86]。

製鋼工場の転炉はつぼ型をしており、少量の鉄スクラップ、銑鉄、生石灰などを入れて、高圧で高純度の酸素が吹き込まれる。炭素やケイ素、マンガンなどとの急速な反応で発生した酸化熱で生じた氧化物やリン、硫黄などの不純物は、生石灰などと化合し、比重の軽い転炉スラグとして安定化して取り除かれる[86]。転炉と異なり鉄スクラップを原料とする電気炉には、アーク式と高周波誘導式がある[85]。アーク式は、鍋形をした電気炉の蓋に垂直に差し込まれた黒鉛製の太い電極に電流を流しアークを発生させ、酸素を吹き込み、電弧熱と反応熱で鉄スクラップを酸化精錬する方式である。高周波誘導式は、高周波の電流をルツボ周りに巻いたコイルに流し、鉄スクラップに発生する誘導電流の抵抗熱で精錬する方式である。生成した溶鋼は連続鑄造設備で固められ、半製品である鋼片となる。溶鋼を最上部の鑄型に注ぎ、側面が凝固した鋼を鑄型の底から、垂直またはカーブさせながら下へ連続的に引き出す。固まった帯状の鋼片をガス切断機で所定の長さに切り、スラブ、ビレット、ブルームなどと呼ばれる半製品にする。

半製品は、目的の形に鑄込む鑄造、鋼塊を叩いて形作る鍛造、熱した鋼片をダイスに通す押出しや、ロールで押し伸ばす圧延によって、製品として加工される。一般的に馴染みの深いほとんどの製品は圧延によって製造されるが、圧延機は製造する製品により異なる形をしている。薄板製品を例にとると、加熱された厚さ約 250 mm のスラブをロールで上下に挟んで押し伸ばし、最終的に最小 1.2 mm まで薄くする熱間圧延と、その圧延された鋼板を常温でさらに薄く 1 mm 未満にする冷間圧延がある[86]。

鉄鋼業は構造物や家電製品などの多くの製品に使用される鋼を製造しているが、製造業の GHG 排出の 4 割を超える最大の GHG 排出産業である。高炉における石炭由来のコークスを用いた還元反応で大量の  $\text{CO}_2$  が発生するためである。製鉄所内のエネルギーを有効利用するため、副生ガスであるコークス製造時に発生するコークス炉ガスや高炉から発生する高炉ガスなどは、鋼材の加熱や発電に使用されている[87]。また、鉄鋼プロセスのカーボンニュートラルを実現するため、石炭の代わりに水素を用いる水素還元製鉄などの技術開発が行われている[88, 89]。

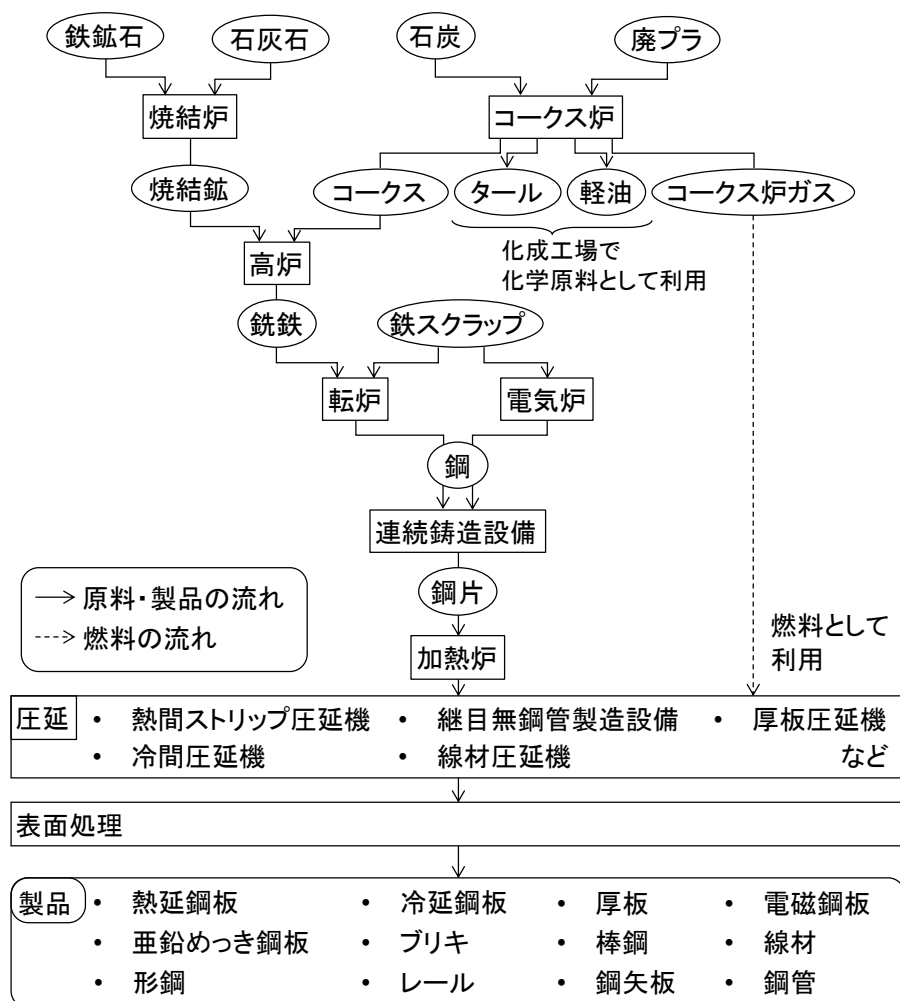


Figure 2-4. 鉄鋼プロセスと製品 [85, 86]

石油化学工業の製造プロセスと製品を Figure 2-5 に示す[90]。石油化学工業では、石油や天然ガスから合成樹脂、合成繊維原料、合成ゴムなど様々な化学製品を製造する。主原料には、日本やヨーロッパでは原油を精製して得られる「ナフサ」（粗製ガソリン）が、アメリカ、カナダ、中東産油国では天然ガスや原油採取時の随伴ガスに含まれるエタンが使用される。最近では、アメリカを中心とした頁岩層に含まれる天然ガス（シェールガス）を利用した安価な原料や、中国の石炭化学による石油化学製品の生産が拡大しつつある。

海外の油田から運ばれてきた原油は、①石油精製工場、②ナフサ分解工場、③石油化学誘導品工場といった工場をパイプラインでつないだコンビナートに運ばれる。ナフサは、ナフサ分解工場で、高温のナフサ分解炉の中の管を通り、熱分解反応を起こして、エチレンやプロピレン、ブタジエン、ベンゼン、トルエン、キシレンなどになる。これ

らは、石油化学基礎製品と呼ばれ、蒸留により分離される。石油化学基礎製品は石油化学誘導品工場（中間製品工場）でさらに別の物質につくりかえられる。石油化学誘導品工場は、原料の石油化学基礎製品や製造する誘導品の種類により、様々な製造プロセスを持つ。製造された石油化学誘導品（中間製品）は、コンビナート外にある関連産業工場で加工され最終製品となる。

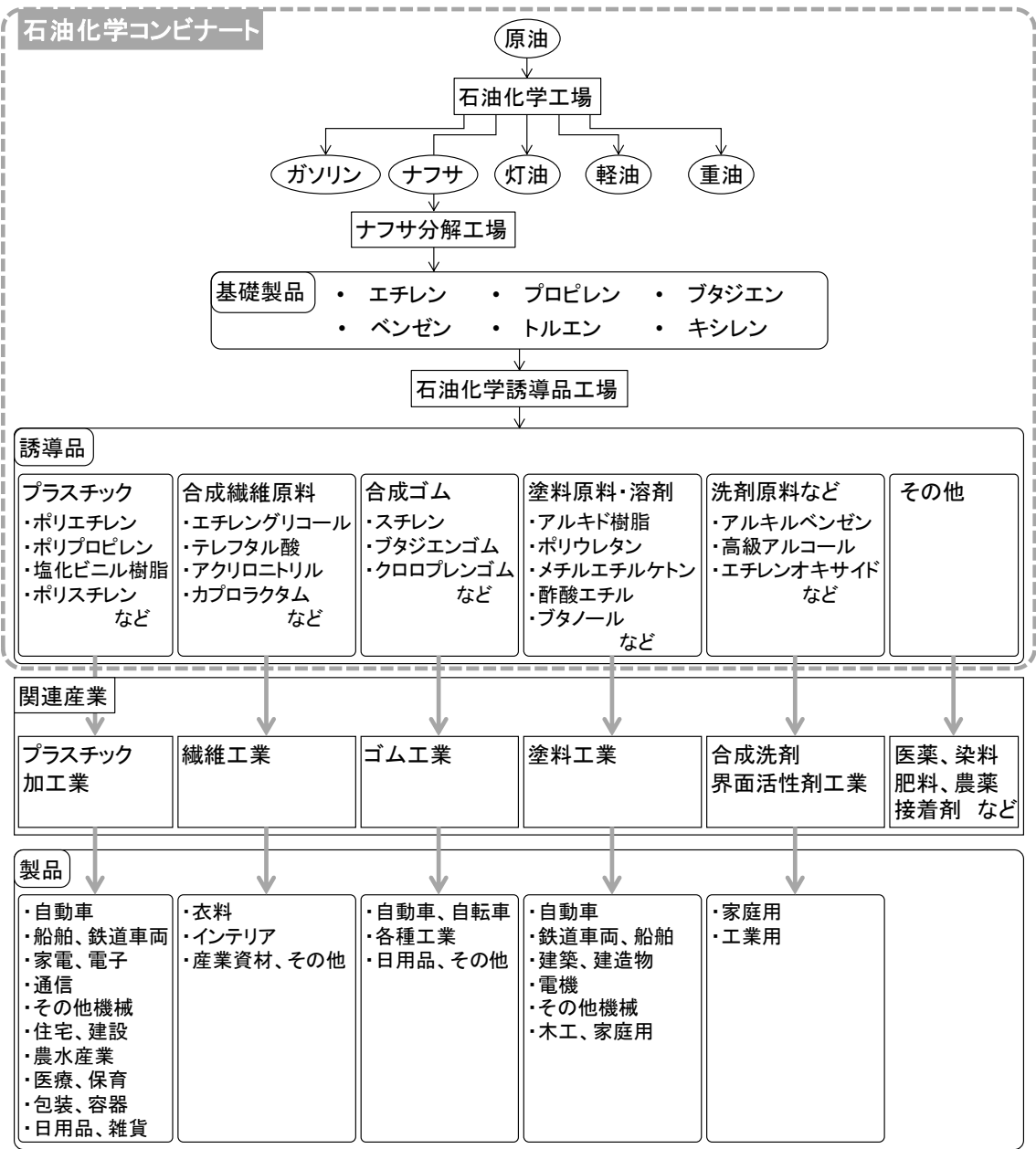


Figure 2-5. 石油化学プロセスと製品 [90]

石油化学工業では、化石燃料などを燃焼させて熱エネルギーを得る過程で  $\text{CO}_2$  が発生する。GHG の削減対策として、炭素を原料として利用できることを活かし、発生した  $\text{CO}_2$  と水分解によって得られる水素を使い、オレフィンなどのプラスチック原料を製造する人工光合成などのカーボンリサイクル技術の開発が行われている[47]。

窯業・土石分野で多くの  $\text{CO}_2$  を発生しているのはセメント業である。Figure 2-6 にセメントの製造プロセスと製品を示す[91, 92]。セメントの主原料である石灰石や、粘土、珪石、鉄さいなどを調合し予熱機から回転窯（ロータリーキルン）に投入し、 $1,450^\circ\text{C}$  以上の高温で焼成する。この焼成過程は石灰石の主成分である  $\text{CaCO}_3$  からの脱炭酸反応が起こるため、多量の  $\text{CO}_2$  が発生する[47]。空気で急冷すると、水硬性をもった 1 cm 程度の黒い塊であるクリンカとなる。焼成用の熱エネルギー源として使用される石炭や廃棄物等の灰分もクリンカに取り込まれるため、二次廃棄物は生じない。クリンカを急冷し熱を持った空気は、キルンや仮焼炉の燃焼用として利用される。また、余熱機の排ガスも原料の乾燥や排熱発電に利用される。仕上工程では、クリンカにせっこう、混合材を添加し、平均粒径 10  $\mu\text{m}$  程度に微粉碎してセメントを製造する。セメントの主要成分である  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を含む物質であれば原料として使用できるため、製鉄所の副産物の高炉スラグや、石炭火力発電所の石炭灰など、各種の廃棄物の約 2,900 万 t/y が利用されている。様々な副産物や廃棄物を使うため、原料工程では、各原料の受入れ時に水分や化学成分を測定する。調合原料は、蛍光 X 線分析装置で化学成分を定量し、原料成分制御システムにより調整される。仕上工程で様々な品質検査を行い、出荷される。

$\text{CO}_2$  削減のためには、1970 年代のオイルショック以降、セメント製造の過程で発生する排熱の利用など省エネルギー設備を導入したり、セメント原料に産業界や一般家庭の廃棄物や副産物を利用したりすることが既に行われている[93]。また、主な  $\text{CO}_2$  の発生工程である予熱器での  $\text{CO}_2$  回収技術や、 $\text{CO}_2$  と廃コンクリートなどの廃材から抽出した Ca から  $\text{CaCO}_3$  を製造する技術の開発も行われている[94]。



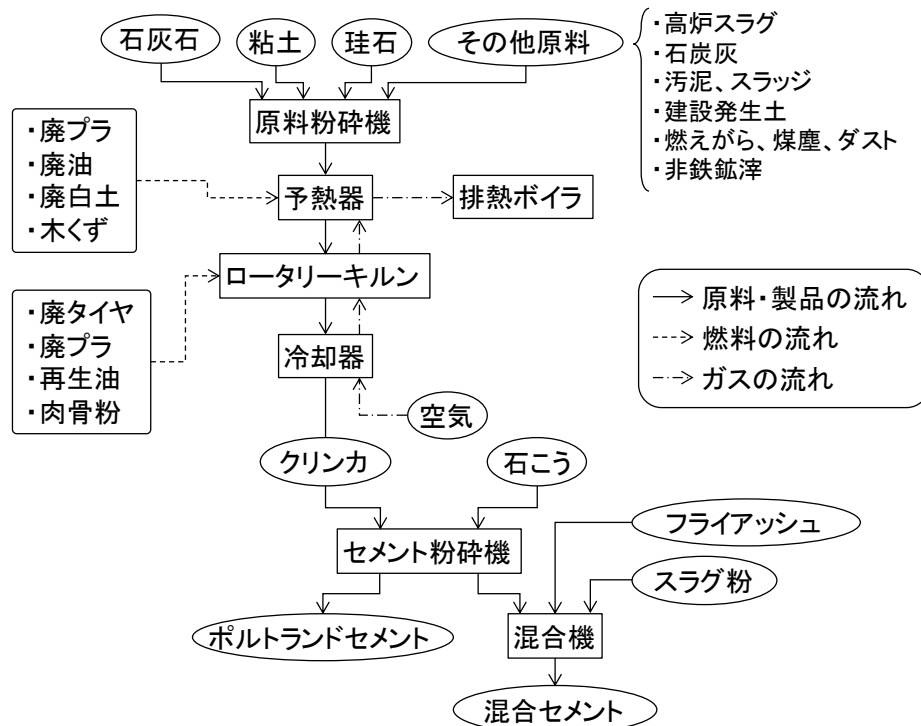


Figure 2-6. セメント製造プロセスと製品 [91, 92]

紙は、紙と板紙の2つに分類される。紙には、新聞用紙や印刷・情報用紙、包装用紙、衛生用紙などで、板紙は、段ボール原紙や紙器用板紙などがある。製紙プロセスを Figure 2-7 に示す[95-97]。木材チップから作られる木材パルプと、古紙から作られる古紙パルプを使い、紙が作られる。

木材パルプには、化学的に繊維を抽出した化学パルプや、機械的にすりつぶす機械パルプがある[98]。化学パルプの中でクラフトパルプの製造方法を Figure 2-7 に示す[95-97]。蒸解工程で、蒸解釜に木材チップと薬品を入れて高温高压で煮込み、リグニンを溶かし繊維(パルプ)を取り出す。繊維以外のリグニンを含む物質は黒液として回収され、ボイラの燃料として利用される。洗浄・漂白工程で、パルプを洗浄し、異物を除去し、さらに残ったリグニンを酸素などの薬品で除去し、木材パルプを生成する。

古紙パルプは原料に古紙を用いて製造するパルプであり、新聞用紙や印刷用紙、衛生用紙などの原料となる、印刷インクを取り除き漂白したパルプを脱墨パルプ(DIP)と、段ボール原紙などの原料となる脱墨しない古紙パルプがある[98]。DIPの製造工程を Figure 2-7 に示す[95-97]。離解工程で、パルパーと呼ばれるミキサーに古紙を入れてほぐし、異物を剥離させ、粗選工程で異物を除去する。脱墨工程では、フローテーターと

呼ばれる装置で空気を吹き込み、パルプについたインクを泡に付着させ剥離し除去する。洗淨・漂白工程で細かい不純物を取り除き漂白して古紙パルプができる。

パルプから紙を抄く製造プロセスを Figure 2-7 に示す[95-97]。ワイヤーパートでは、プラスチック製のワイヤー（網）にパルプを広げ水分をろ過し、プレスパートでロールとフェルトの間に挟んで機械的に水分を絞る。ドライヤーパートでは、蒸気で加熱した鉄製の筒であるシリンダーに紙を密着させて乾燥させる。コーターで、石灰や粘土から作られる化粧材を薄く紙の表面に塗り、カレンダーで紙を硬いロールと軟らかいロールの間に通して、表面を滑らかにする。ワインダーで紙を巻き取り、カッターで所定の大きさに切り出荷される。

製紙プロセスでは、紙の乾燥用の熱エネルギーを得るために、化石燃料や黒液などのバイオ燃料を燃焼させる過程で  $\text{CO}_2$  が発生しているが、乾燥工程の電化は現在では困難とされている。GHG 削減に向け、省エネルギー化やバイオ燃料を増加させる技術力開発[63]や、廃材の利用や植林による紙のライフサイクルでの GHG 削減が行われている[47]。

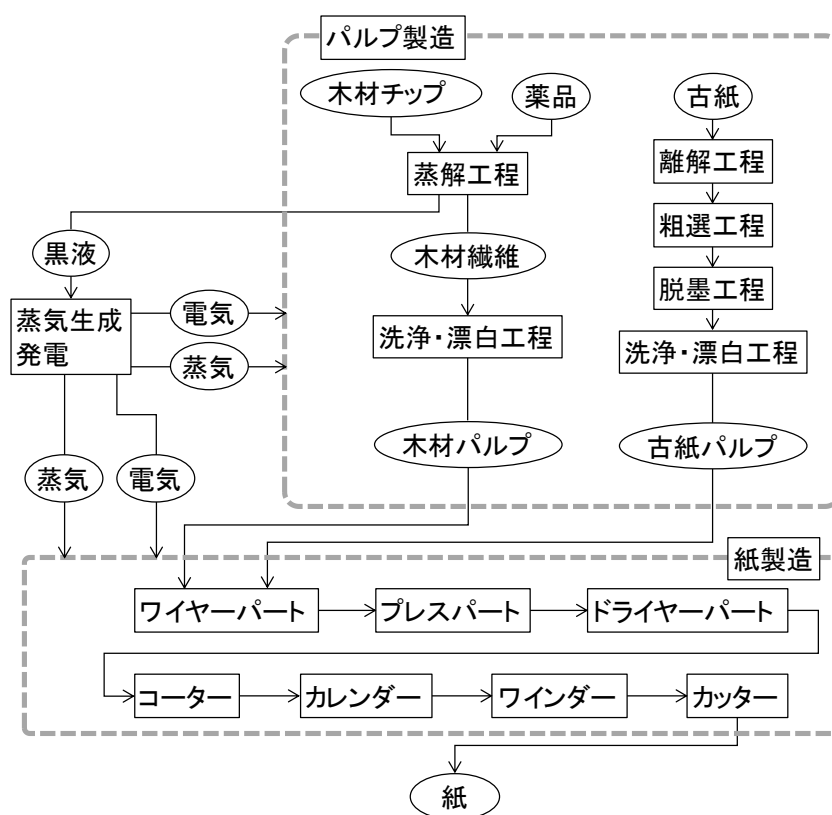


Figure 2-7. 製紙プロセス [95-97]

製造業では製造プロセスごとに GHG 排出削減対策が行われていることがわかる。製造プロセスの変更は、その業種内の関係者で進められる案件であり、製造業としても取り組みやすいと考えられる。一方で、再エネの導入は、エネルギー業界や、再エネの変換設備を設置する地域との連携が必要で、製造業だけでは進められないため、製造業として取り組みにくいと考えられる。

### 2.1.3. 製造業によるエネルギー利用

製造業の業種別の比較として、業種ごとに使用されるエネルギーの特徴を調査した。Figure 2-8 に業種別エネルギー使用量と事業所当たり GHG 排出量を示す[81]。グラフの上側に位置するのは、電力の利用の多い業種であるが、事業所当たりの GHG 排出量が比較的少ないことがわかる。一方で、グラフの下側には、電力以外に蒸気や熱としてのエネルギーの利用の多い業種が集まっており、事業所当たりの GHG 排出量が比較的多いことがわかる。

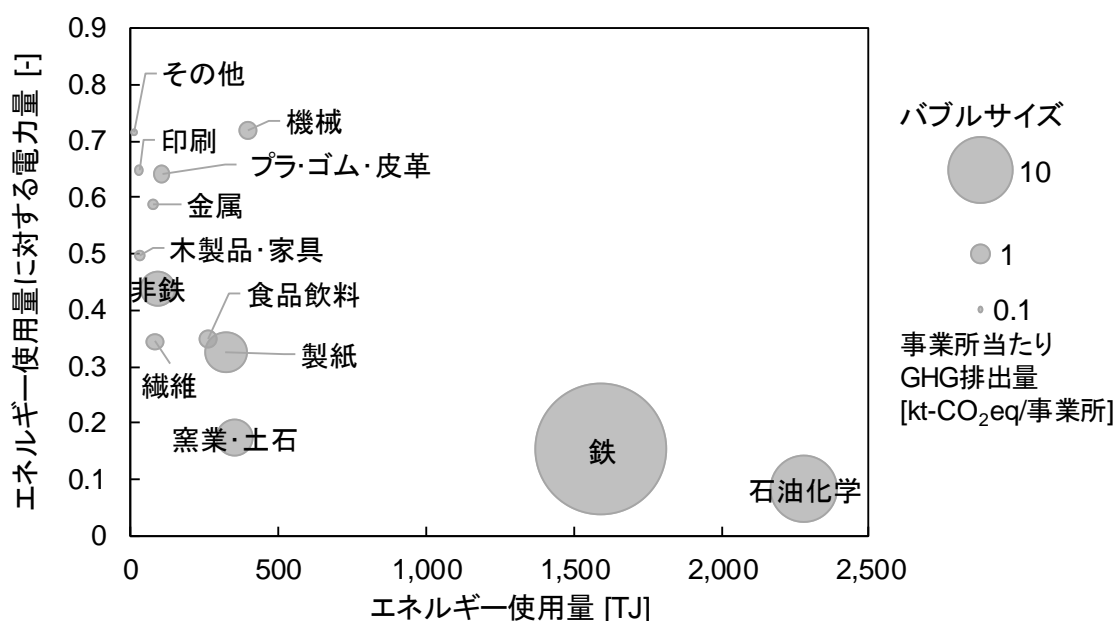


Figure 2-8. 業種別エネルギー使用量と事業所当たり GHG 排出量 [81]

次に、事業所当たりエネルギー使用量と自家用発電および蒸気の内訳を Figure 2-9 に示す[81]。グラフの左下には、自家用の発電設備や蒸気生成設備といった熱電供給設備を持たない業種が集中しているが、これらはバブルサイズが小さいことからエネルギー使用量が少なく、自家用の熱電供給設備が不要であることがわかる。グラフの右側に

位置した業種は、自家用の熱電供給設備を所有しており、電気と蒸気の両方の利用量が多いことがわかる。左上に位置する業種がないことから、大規模な自家用の蒸気生成設備のみを持つ業種はないことがわかる。

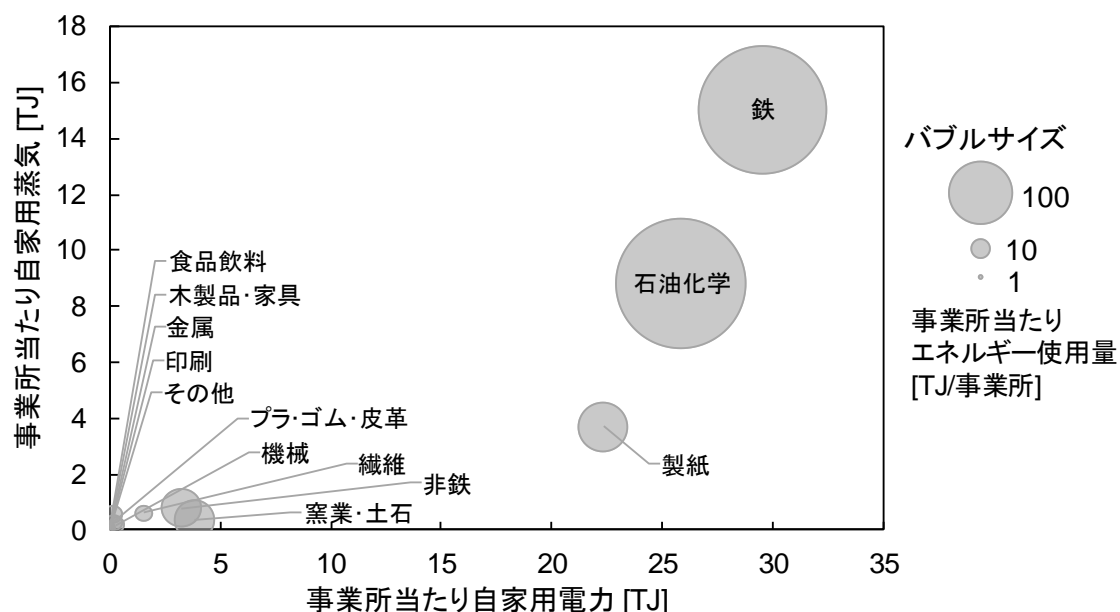


Figure 2-9. 事業所当たりエネルギー使用量と自家用発電および蒸気 [81]

以上のことから、電力の利用が多く、自家用の熱電供給設備を持たない業種では、電力系統からの電力を利用していると考えられる。そのため、電力部門からの GHG 排出量を削減することが、これらの業種の GHG 排出量を削減することにつながる。一方で、鉄鋼、石油化学、窯業・土石、製紙の分野では、電力以外のエネルギーの利用が多く、自家用の熱電供給設備を持つという特徴がある。既に述べたように、業種ごとに GHG 削減のための技術開発は行われており、特に製造プロセス由来の GHG については業種ごとの対策が不可欠である。しかし、エネルギーを利用する過程で発生する GHG については業種に関わらず共通する課題と言える。また、再エネを利用したエネルギー供給は、地域との連携も必要であり、製造業にとっての専門外となるため、対策方法の立案が難しいと考えられる。そこで本研究では、熱電供給設備を持つ業種に共通した対策に焦点を絞ることとする。

熱電供給設備として、ボイラとタービンを持つ工場の場所を調査した。ボイラのある工場には蒸気タービンがあるため、タービンを持つ工場の場所を調査することとした。1000 kW 以上の蒸気タービンまたはガスタービンを持つ工場の場所を Figure 2-10 に示す[99]。上述したように、製造業は事業所ごとに生産活動を行っているため、GHG の削

減は事業所単位で対策する必要がある。熱電供給設備を持つ工場は全国各地に存在するため、蓄熱技術で出力調整された地域の再エネと組み合わせて利用することが効果的であると考えられる。

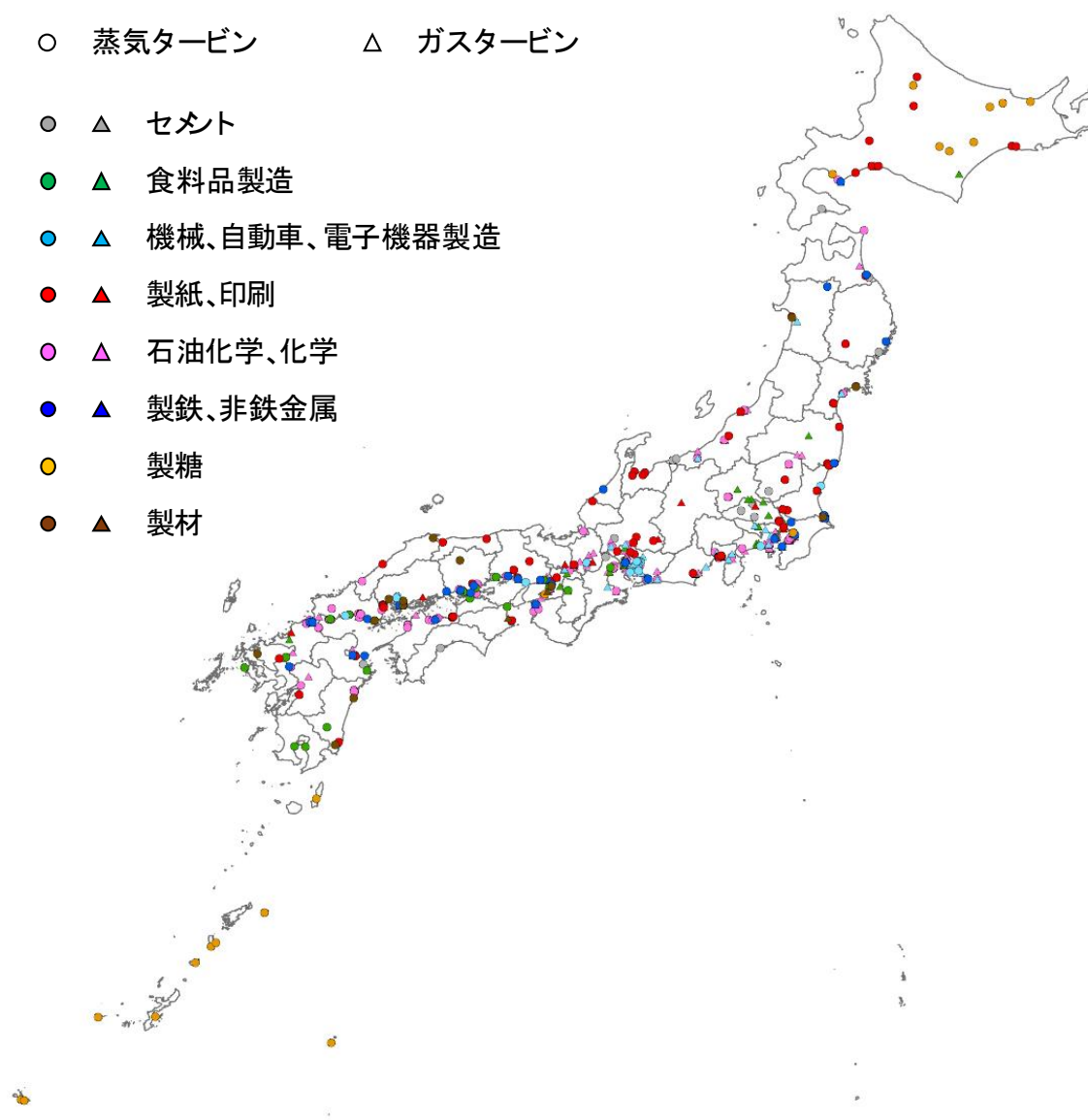


Figure 2-10. 蒸気タービンまたはガスタービンを持つ工場 [99]

## 2.2.蓄熱技術を導入した熱電供給システム

本節では、2.1 節で検討対象とすることにした熱電供給設備を持つ工場において、2.2.1 項では、再エネを導入してカーボンニュートラルを実現するための熱電供給システムの代替案を生成する。従来の化石燃料の依存度が高い熱電供給システムを変え、工場とその周辺地域でカーボンニュートラルを実現可能な熱電供給システムを考察する。2.2.2 項では、生成した代替案でのカーボンニュートラルの実現可能性を検証するための概念実証の要件を定義する。

### 2.2.1. 熱電供給システムの代替案

熱電供給設備を持つ工場のある地域において、カーボンニュートラルを実現するための熱電供給システムに求められる条件を整理する。熱電供給システムの代替案に求められる要件としては以下が挙げられる。

- 熱と電気を供給できる。  
エネルギー需要として、工場では、電気だけでなく蒸気を媒体とした熱が利用されている。特に、蒸気タービンを所有している工場では、蒸気タービンの主蒸気となる高圧蒸気の需要がある。そのため、熱と電気の両方を供給可能なシステムとする必要がある。
- カーボンニュートラルを実現するのに十分な変動性再エネを導入するため、変動性再エネの出力に合わせた出力調整ができる。  
カーボンニュートラルを実現するためには、エネルギー源として、再エネの中でも導入ポテンシャルの高い変動性再エネを利用することが求められる。変動性再エネは気候の影響を受けるため、出力が不安定になりやすい。変動性のあるエネルギー源を利用して、需要に合わせたエネルギー供給を実現するためには、変動性再エネの調整力を持ったシステムが必要である。また、カーボンニュートラルの実現可能性について、LCA による評価が必要である。

以上の要件を満たした熱電供給システムとして、本研究では Figure 2-11 に示した再エネ導入前後の工場周辺の熱電供給システムを提案する。Figure 2-11 の上側に示した現状の工場周辺地域の熱電供給システムは、工場と工場外のエネルギー供給フローは分離している。工場外のエネルギーとしては一般的に、化石燃料を用いた発電所由来の電

力や、ガス会社で精製されたガスが用いられている。工場のエネルギーは、化石燃料や廃棄物燃料、製造部門からの副産物などを用いた自家用のボイラやタービンにより供給されている。

Figure 2-11 の下側には、本研究で提案する再エネを導入した工場周辺地域の熱電供給システムを示す。蓄エネ技術と、変動性再エネ以外のエネルギー変換設備がある場所のことをエネルギー拠点と呼ぶこととする。現状では導入されていない、変動性再エネを用いるためのエネルギー変換設備や、蓄エネ技術は新しく導入する。工場が所有する既存設備については、利用可能なものはそのまま利用し、必要に応じて改造などを実施する。再エネを導入した熱電供給システムでは、変動性再エネや廃棄物燃料、必要であれば化石燃料を、エネルギー変換技術で電気や熱エネルギーなどに変換する。エネルギー供給が過剰な場合は蓄エネ技術を利用して貯蔵し、需要に応じてエネルギーを供給する。エネルギー拠点で出力調整することで、地域で得られる再エネを地域内で有効に利用できる。

工場をエネルギー拠点とした熱電供給システムを導入することで、工場や地域の再エネ導入量を増加させ、工場と地域のカーボンニュートラルを実現することが期待できる。熱電供給設備を持つ工場は全国各地に存在しているため、すべての工場で再エネを導入した熱電供給システムが導入することができれば、カーボンニュートラルの達成または達成に近づく地域が増加すると予想される。工場の周辺地域に十分なエネルギー需要がなくても、送電網の容量に余裕があれば、域外のエネルギー需要が高い時に合わせて売電することも可能となる。国レベルでの課題となっている製造業のカーボンニュートラルと、地域のカーボンニュートラルの両方の対策になると考えられる。

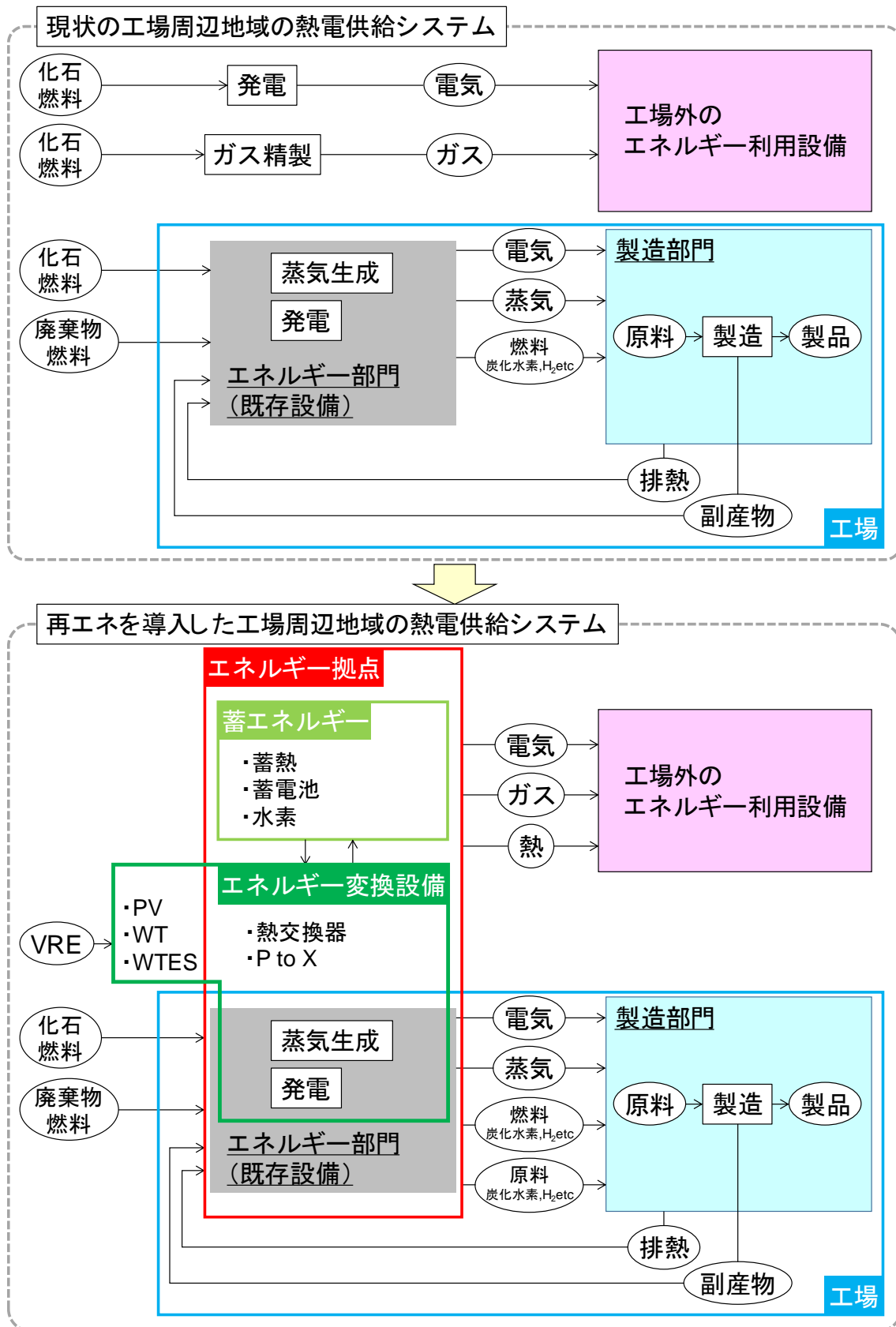


Figure 2-11. 再エネ導入前後の工場周辺地域の熱電供給システム



## 2.2.2. 概念実証の要件定義

2.2.1 項で提案した変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムが、カーボンニュートラルを実現できるかどうかを検証する必要がある。そこで、第3章と第4章で、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証を行うこととする。概念実証（Proof of concept、PoC）は、新しい概念や技術などの実用化に向けてその実現可能性を検証することで、IT 業界などでは新しいシステムの付加価値やサービスの仕様を検証することを示す[100]。一方で研究開発の分野では、実用化に向けた具体的な設計や開発の前に行う研究コンセプトの検証と位置づけられることや[101]、初期段階の技術についてビジネスと技術的な側面から実現可能性を証明することとされることがあり[100]、研究内容や目的によって検証内容は異なる。

そこで本研究では、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証として技術評価に重点をおき、工場とその周辺地域の需要に応じたエネルギー供給およびカーボンニュートラルの実現可能性を検証することとする。第3章では、仮想的な製紙工場を対象としたケーススタディで、製紙工場の熱電供給システムのモデルを構築し、1年間を通じたエネルギー収支のシミュレーションにより、工場とその周辺地域の需要に応じた熱電供給が可能かを検証する。また、LCAを行い、蓄熱技術などの新たに導入する設備のライフサイクルにおける GHG 排出量を求め、カーボンニュートラルの実現可能性を評価する。第4章では、第3章で構築したモデルを用いて、日本各地の製紙工場において蓄熱技術を導入した熱電供給システムの実現可能性を検証する。第5章では、蓄熱技術以外の蓄エネ技術と比較を行い、蓄熱技術の優位性を評価する。以上の検討より、蓄熱技術を導入した熱電供給システムが工場とその周辺地域でカーボンニュートラルを実現可能であることの概念実証をする。蓄熱技術を導入した熱電供給システムについて、概念実証の段階から実現につなげるため、熱電供給システムのエネルギー供給力を決めるための設計変数を整理し、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムのある工場と地域の在り方を考察する。

## 第3章 製紙工場における蓄熱技術と風力を導入した熱電供給システム

---

### 3.1.概要：蓄熱技術を導入した製紙工場

本章では、第2章で提案した蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証をするため、熱電供給設備を持つ製紙工場を対象としたケーススタディを行った。製紙工場の熱電供給システムのモデルを構築し、1年間を通したエネルギー収支のシミュレーションを実施して、工場とその周辺地域の需要に応じた熱電供給が可能かを検証した。また、LCA 評価によって TES などの新たに導入する設備のライフサイクルにおける GHG 排出量を求め、カーボンニュートラルの実現可能性を評価した。

導入する変動性再エネは風力とした。風力以外の変動性再エネである太陽エネルギーは、1日をサイクルとした変化をするため、比較的エネルギー供給量が予測しやすい。本研究では変動性の予測の難しい風力を利用した時について検討するため、風力と TES の組み合わせを評価することとした。風力と TES を組み合わせた技術として、風力熱発電が提案されている[37]。風力熱発電は、風力熱変換器 (WEC<sub>th</sub>) で風力から熱を生成し、蓄熱材料である熔融塩に蓄熱し、需要に応じて発電するシステムである。本研究では風力熱発電と熱電供給システムの組み合わせを検討することとする。Figure 3-1 に本研究で対象とした蓄熱技術を導入した熱電供給システムを示す。蓄熱材料の熔融塩を加熱するための燃焼炉や風力を利用する WEC<sub>th</sub> から得られる熱エネルギーをすべて一度 TES に蓄え、需要に応じて発電や蒸気の生成に利用するものである。この熱電供給システムを製紙工場に導入することを検討した。製紙工場は、事業所当たりの GHG 排出量が多く (2.1.2 項参照)、電力と 100~200℃の範囲の蒸気を大量に使用している[102]。これらのエネルギーを供給するために、石炭や重油などの化石燃料や、黒液やパルクなどの製紙の副産物や廃棄物燃料が、自家用のボイラやタービンで使用されている[99]。

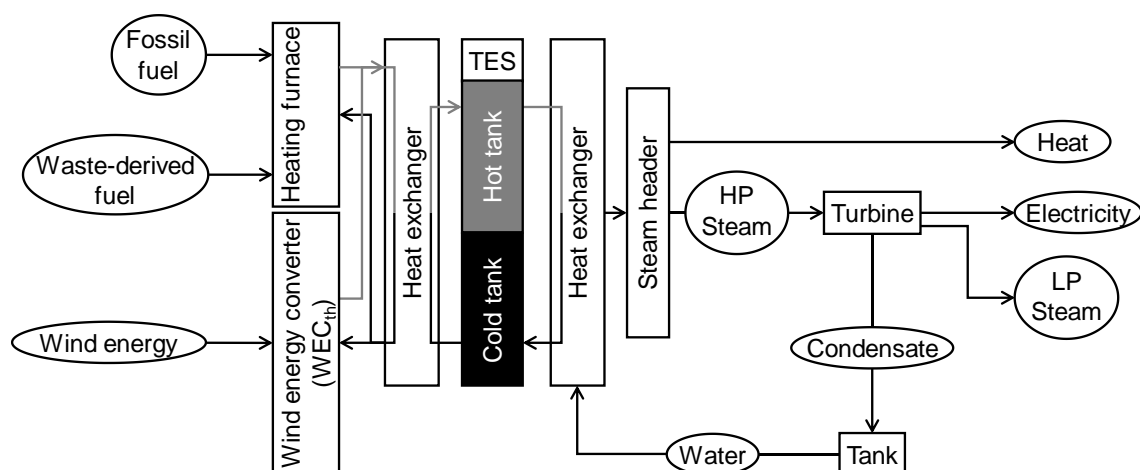


Figure 3-1. Heat and power supply system installed TES and WEC<sub>th</sub>.

製紙工場で蓄熱技術を導入した熱電供給システムの評価は以下の手順で行った。3.2 節では、熱電供給システムのモデルを構築した。シミュレーションをするために、エネルギー収支について数式を立式し、導入シナリオを設定した。3.3 節でエネルギー収支のシミュレーションの結果を示し、熱電供給システムからの売電・売熱量や LC-GHG を分析した。3.4 節では、3.3 節で得られた結果を基に、製紙工場で期待される風力の利用について考察した。

## 3.2. 蓄熱技術を導入した製紙工場のモデル構築

### 3.2.1. 蓄熱技術と風力を導入した製紙工場のエネルギー需給フロー

本研究で検討した紙製品と動力設備のライフサイクルを Figure 3-2 に示す。本研究で対象とするライフサイクルバウンダリには、紙製品については紙を製造するまでの Cradle-to-gate の範囲を、導入を検討する TES と WEC<sub>th</sub> については廃棄するまでの Cradle-to-grave の範囲のライフサイクルを含めた。製紙工場は、本研究で想定するシナリオと現状は同じため、バウンダリには含めなかった。

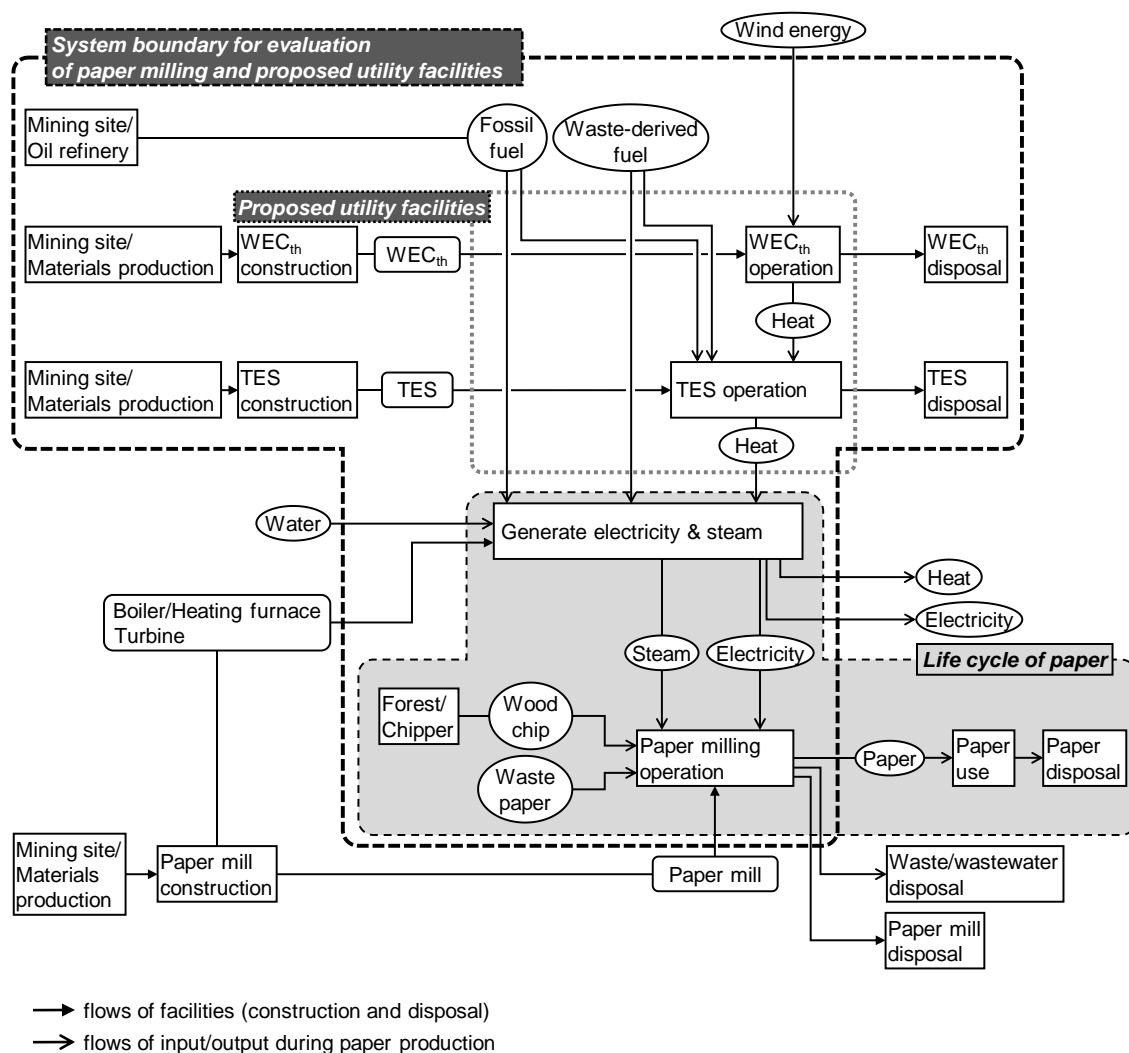


Figure 3-2. Life cycles of paper products and utility facilities examined in this study. The rounded-corner objects represent facilities that are used for a long time, such as a paper mill, WEC<sub>th</sub>, and TES. Adapted from [i].

Figure 3-3 に、紙の製造工程（PMP）とエネルギーフローを示す。PMP は、破線で描かれた角が丸みを帯びた四角い部分に示されており、本研究で検討したすべてのシナリオに共通するプロセスである。PMP は、一般的な製紙工場のプロセスであり[103]、木材チップと古紙から繊維を取り出し、パルプと古紙パルプを製造する。晒クラフトパルプ（BKP）製造の副産物として得られる黒液は、バイオ燃料とみなされ製紙工場で使用される。従来の製紙工場のエネルギーシステム（C-PMES）では、化石燃料、廃棄物由来燃料（WDF）、黒液を使って生成した電気と蒸気を PMP に供給している。自家発電用のボイラで発生した高压蒸気（10 MPa）は、主に発電とタービンからの抽気または背圧の低压蒸気（0.25 MPa および 1.2 MPa）の生成に使用され[102]、一部は低压蒸気の不

足分を補うために減圧される。タービンからの復水や PMP からのドレンは回収してボイラで再利用する。

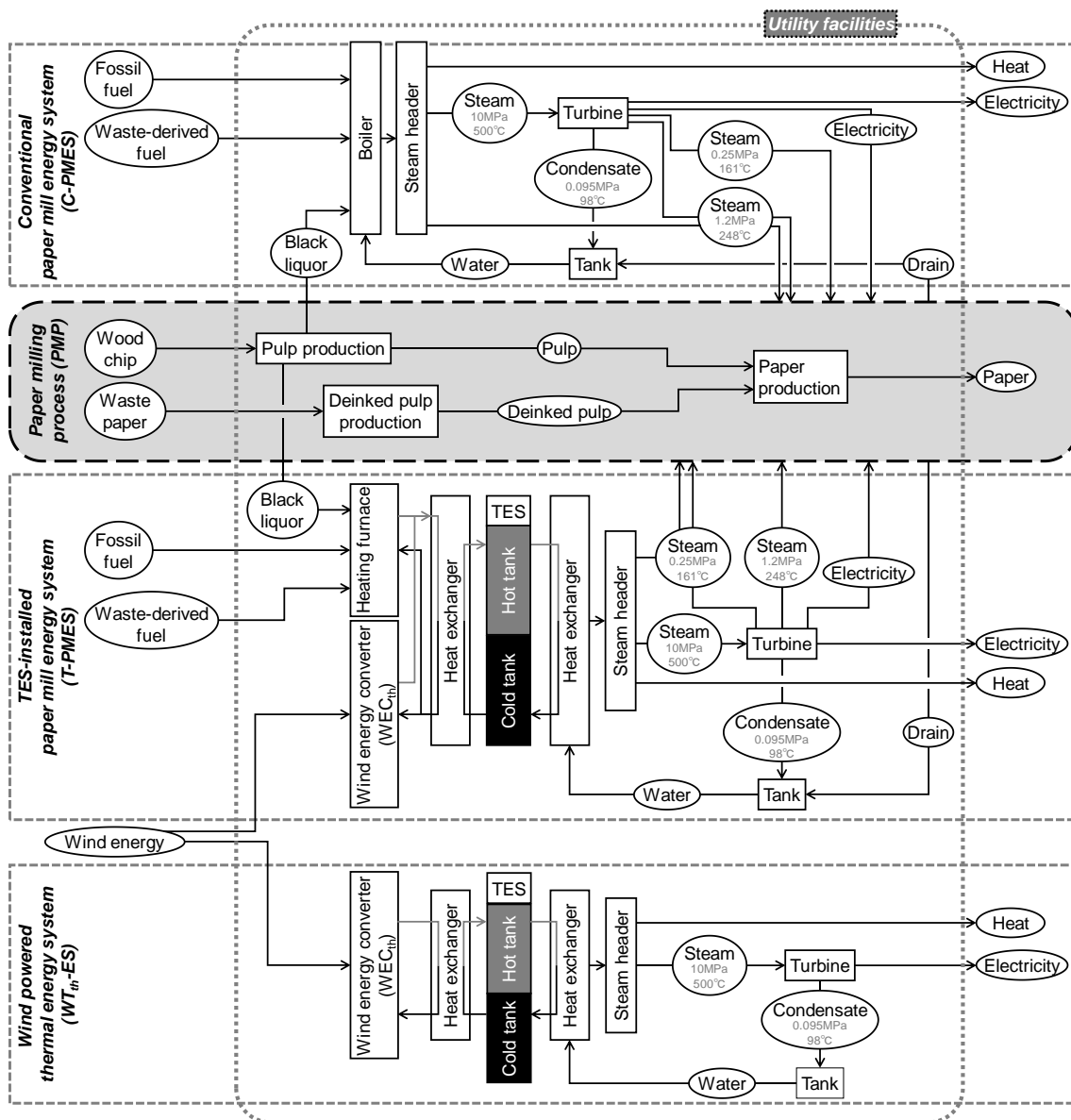


Figure 3-3. Energy flows of paper production and power generation derived from wind. Adapted from [i].

TES を設置した製紙工場のエネルギーシステム (T-PMES) では、TES と  $WEC_{th}$  を導入した代替エネルギーシステムである。 $WEC_{th}$  と製紙工場で購入可能な燃料を用いた加熱炉から発生した熱エネルギーを蓄熱し、需要に応じて蒸気や電気に変換した。TES に蓄えられた余剰の熱エネルギーは、電力系統に接続するための電力や、地域熱供給のための熱に変換し、売電および売熱するとした。比較対象としては、製紙工場とは関係な

く風力エネルギーを利用する場合として、風力熱発電システム（WT<sub>th</sub>-ES）を定義した（Figure 3-3）。WT<sub>th</sub>-ES は、WEC<sub>th</sub> で熱エネルギーを生成し、TES を介することで常時発電して売電すると仮定した。

### 3.2.2. 蓄熱技術と風力を導入した製紙工場のモデル

3.2.1 項で述べた代替案に基づいて、製紙工場、TES、および風力利用技術のエネルギーフローを数式で表した。製紙工場の生産規模は既存モデル[104]に基づき、多種類の紙やパルプを生産する大規模工場と同等とした。以下では、モデル構造の主要な設定を個別に示す。3.2.3 項では Figure 3-2 と Figure 3-3 のバウンダリ内に存在するユニットのエネルギーフローについて立式した。今回のモデリングで使用したパラメータ設定を Table 3-1 に示す。

Table 3-1. Parameter settings. Adapted from [i, ii].

Parameter	Value	Assumption
<b>Product amount [t/y]</b>		
BKP	334,000	Calculated from [105, 106]
TMP	15,800	Calculated from [105, 106]
DIP	6,380	Calculated from [105, 106]
Newsprint paper in rolls	161,000	Calculated from [105, 107]
Uncoated printing paper	103,000	Calculated from [105, 107]
Coated printing paper	218,000	Calculated from [105, 107]
Sanitary paper	104,000	Calculated from [105, 107]
White board	89,400	Calculated from [105, 107]
<b>Capacity utilization ratio [%]</b>		
BKP	70	[107]
TMP	70	[107]
DIP	70	[107]
Newsprint paper in rolls	87	[107]
Uncoated printing paper	87	[107]

Table 3-1. Parameter settings. Adapted from [i, ii]. (continued)

Coated printing paper	87	[107]
Sanitary paper	87	[107]
White board	93	[107]
<b>Periods of maintenance stops [d]</b>		
Long-term	15	
Short-term	1	
<b>Number of times there were short-term maintenance stops per year [-]</b>		
Pulp production	0	
Paper production	35	Calculated from the capacity utilization ratio
Board production	15	Calculated from the capacity utilization ratio
<b>Load of production line [%]</b>		
Pulp production	73	Calculated from the capacity utilization ratio
Paper production	100	
Board production	100	
<b>Heating value</b>		
Black liquor	13.9 MJ/BDkg	[104]
Bark	13.9 MJ/BDkg	[104]
Scrap tire	14.4 MJ/BDkg	[104]
Paper sludge	33.5 MJ/kg	[104]
Refused plastic and paper fuels (RPF)	10.9 MJ/ADkg	[104]
Heavy oil	41.7 MJ/L	[104]
Natural gas	40.9 MJ/Nm <sup>3</sup>	[104]
<b>Steam of outlet of boiler</b>		
Temperature [°C]	500	[102]
Pressure [MPa]	10	[102]

Table 3-1. Parameter settings. Adapted from [i, ii]. (continued)

<b>Rated capacity of turbine [MW<sub>e</sub>]</b>		
Condensing extraction turbine	45	Pressure of extraction steam: 0.25 MPa [102]. Efficiency: 19% HHV
Condensing extraction turbine	49	Pressure of extraction steam: 1.2 MPa [102]. Efficiency: 19% HHV
<b>Recovery ratio [%]</b>		
Condensate	90	Inlet water of boiler/outlet water of condenser
Drain	70	[102] Inlet water of boiler/outlet water of paper milling process
<b>Scale of windmill</b>		
Diameter of rotor [m]	80	[108]
Rated capacity [kW]	2,100	[108]
Wind speed of cut-in/cut-off [m/s]	4/25	[108]
<b>Molten salt of TES in the hot/cold tank</b>		
Inlet temperature [°C]	580/290	[37]
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1740.2/1905.5	Temperature: 500 °C/290 °C, 60 wt% NaNO <sub>3</sub> and 40 wt% KNO <sub>3</sub> [26]
Specific heat of molten salt ( <i>C<sub>p</sub></i> [J/kg K])	1543	(>222 °C: the melting point). 46 wt% NaNO <sub>3</sub> and 54 wt% KNO <sub>3</sub> [109]
Intercept of enthalpy of molten salt ( <i>b</i> )	−392828	(>222 °C: the melting point). 46 wt% NaNO <sub>3</sub> and 54 wt% KNO <sub>3</sub> . Enthalpy of molten salt is calculated with <i>C<sub>p</sub></i> and <i>b</i> (equation (3-28)). [109]



Table 3-1. Parameter settings. Adapted from [i, ii]. (continued)

Lifetime [y]	20	[42]
<b>TES tank</b>		
Diameter [m]	22.4	[42]
Minimum molten salt level height [m]	0.7	[110]
<b>Thickness of lateral walls of TES tank [mm]</b>		
SUS304 stainless steel	40	[110]
Mineral wool	400	[110]
Aluminum sheet	1	[42]
<b>Thickness of roof of TES tank [mm]</b>		
SUS304 stainless steel	6	[110]
Calcium silicate board	400	[110]
Aluminum sheet	1	[42]
<b>Thickness of the bottom of TES tank [mm]</b>		
SUS304 stainless steel	40	Calculated from [110]
Firebricks	455	Calculated from [42]
Sand	196	Calculated from [42, 111]
Concrete	926	Calculated from [42]
<b>Thermal conductivity [W/(m K)]</b>		
SUS304 stainless steel	21	[110] at 500 °C
Mineral wool	$0.037+0.0002T$	[110] $T$ : Temperature [°C]
Aluminum sheet	237	[112]
Calcium silicate board	$0.0674+4\cdot 10^{-5}(T+273.15)$ $+6\cdot 10^{-8}(T+273.15)^2$ $+9\cdot 10^{-12}(T+273.15)^3$	[110] $T$ : Temperature [°C]
<b>Heat transfer coefficient to the tank wall [W/m<sup>2</sup> K]</b>		
Air	10	[113]
Molten salt	500	[113] (referred from water)

Table 3-1. Parameter settings. Adapted from [i, ii]. (continued)

Heating/cooling devices in the vicinity		
Coefficient of performance (COP)	0.7	[12]

### 製紙工場

製紙工場の生産規模は、日本の大規模工場を参考に、2,120 t-paper/d とした[105]。製紙工場は、24 時間操業で、固体、液体、気体の燃料を使用できる。紙製品は、既存のモデルに基づいて製紙工場の一般的な製品として、BKP、サーモメカニカルパルプ (TMP)、脱墨パルプ (DIP)、新聞用紙、非塗工紙、塗工紙、衛生用紙、白板紙を想定した[104]。対象とした製紙工場での各製品の生産量は、日本の年間生産量の比で配分し Table 3-1 に示したように設定した。製品の生産ラインのスケジュールは、1 年間で 1 時間単位で想定した (Figure 3-4)。化学プロセスと機械プロセスのメンテナンスのためのライン休止は、それぞれ長期と短期とした。化学プロセスであるパルプ製造では長期のメンテナンスが必要であり、機械プロセスである紙・板紙製造には長期と短期のメンテナンスが必要である。メンテナンスのためのライン停止の期間と時間、および生産ラインの負荷は、Table 3-1 に示したとおりに設定した。長期休止の期間は、同一日に行われないように生産ラインごとに調整した。

対象とした製紙工場での燃料は、WDF (バーク、廃タイヤ、スラッジ、古紙および廃プラスチック由来燃料 (RPF))、黒液、石炭、重油、天然ガスとした。ボイラの能力は日本の大規模工場での値を参考にして定義し[105] (Table 3-1 も参照)、加熱炉の能力はボイラと同じと仮定した。製紙工場の TES は、余剰熱を TES に蓄えて売電または売熱に利用する。C-PMES または T-PMES を採用した製紙工場は、売電・売熱量を最大化するために、風力エネルギーと追加の燃料を使用することを想定した。日本では紙の生産量が減少しているため、動力設備の稼働率が低下しているが[114]、燃料を追加して稼働率を上げることで、初期投資を削減することができる。

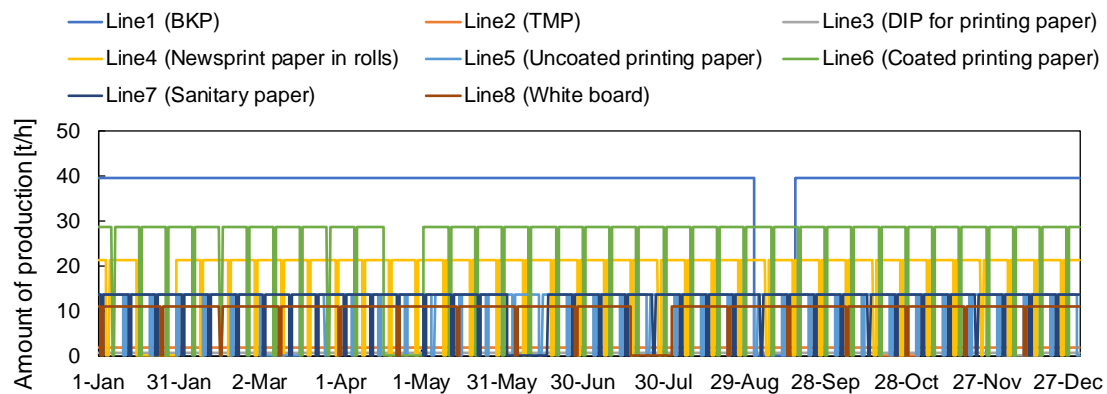


Figure 3-4. Operation schedule for the production lines. Adapted from [i, ii].

## 風力

風力エネルギーは、 $WEC_{th}$  で熱に変換される。 $WEC_{th}$  のローター径やナセルの大きさなどは、既存の風力発電の 2.1 MW<sub>e</sub> 級と同様の規模を想定した (Table 3-1 も参照) [108]。 $WEC_{th}$  の発熱能力は、Figure 3-5 に示したように風速に対して三次関数で表される風力発電の実データに基づいた変換効率から求めた [115]。気象条件は、第 4 章で対象とした製紙工場のある地域の中で最も風速の強い日本の釧路を想定した (Figure 3-6) [116]。

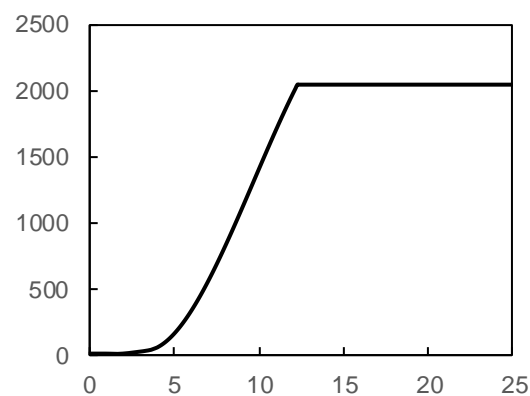


Figure 3-5. Power curve of heat output of a 2.1 MW<sub>th</sub> WEC<sub>th</sub>. The power curve was estimated from the wind turbine data [115]. Adapted from [i, ii].

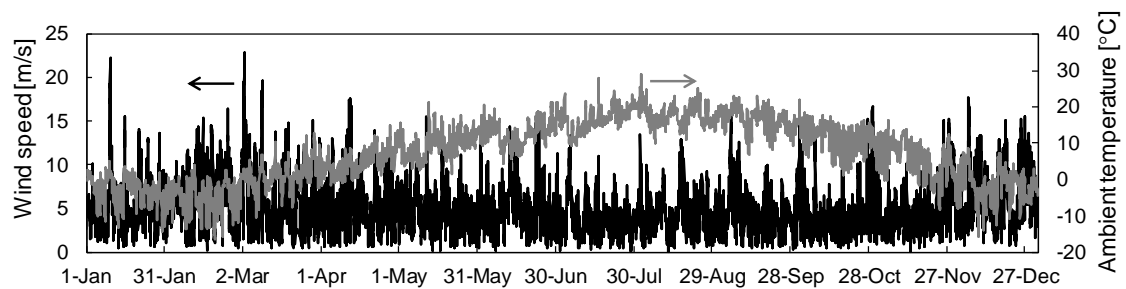


Figure 3-6. Wind speed and ambient air temperature taken from data for Kushiro, 2018 [116]. Adapted from [i, ii].

### 蓄熱技術

溶融塩を貯める TES タンクの構造は、TES タンクからの放熱と、TES タンクの製造や廃棄による GHG 排出量を分析する上で重要である。TES タンクは、高温タンクと低温タンクがあり、その壁は放熱を防ぐために数種類の異なる層で構成されている。TES タンクの構造は、CSP の性能分析のシミュレーションのためにタンクの材料の熱特性がモデル化されており [110]、実際の設備容量に基づいた環境影響も評価されている [42]。本研究では、LCA と TES からの放熱のシミュレーションに Table 3-1 に示した値を使用した。

### 地域の熱需要

製紙工場からの売熱（冷暖房と給湯）は、地域熱供給によって供給すると仮定した。熱需要は、製紙工場がある市町村の業務施設、商業施設、宿泊施設、医療施設のデータ [117] を基に 1 時間ごとに推定した。熱需要データ [117] には、2 種類のデータがあり、1 つは日本の 1 年間の月別代表値である。この月別代表値を  $c_j^{\text{HD}}(T)$ 、温度  $T$  における熱利用施設  $j$  の単位面積当たりの熱需要量とし、地理的に日本の中心に位置する東京の月間熱需要量と月間最高・最低気温との関係 [116] から、気温との関係を推定した (Figure 3-7 参照)。冷房の  $c_j^{\text{HD}}(T)$  は東京の月別最高気温と、暖房・給湯の  $c_j^{\text{HD}}(T)$  は月別最低気温と相関関係を表した。もう 1 種類の熱需要データ [117] は、1 日の最大熱需要に対する熱需要の割合が時間別で季節ごとに表されており、 $r_j^{\text{HD}}(T)$  として Figure 3-8 に示した。時刻  $t$  における熱需要量  $\dot{Q}^{\text{HD}}(t)$  は、 $c_j^{\text{HD}}(T)$ 、 $r_j^{\text{HD}}(T)$ 、施設  $j$  の面積  $A_j$  で表される。

$$\dot{Q}^{\text{HD}}(t) = \sum_j c_j^{\text{HD}}(T_{\text{amb}}(t)) r_j^{\text{HD}}(t) A_j \quad (3-1)$$

式(3-1)により熱需要は時間と気温に応じて推定することができるようになった。Figure 3-9 は推定した熱需要である。気温は Figure 3-6 に示した値を用い、施設の面積は生産量の参考にした製紙工場のある自治体である春日井市内に存在する施設面積を用いた [118]。

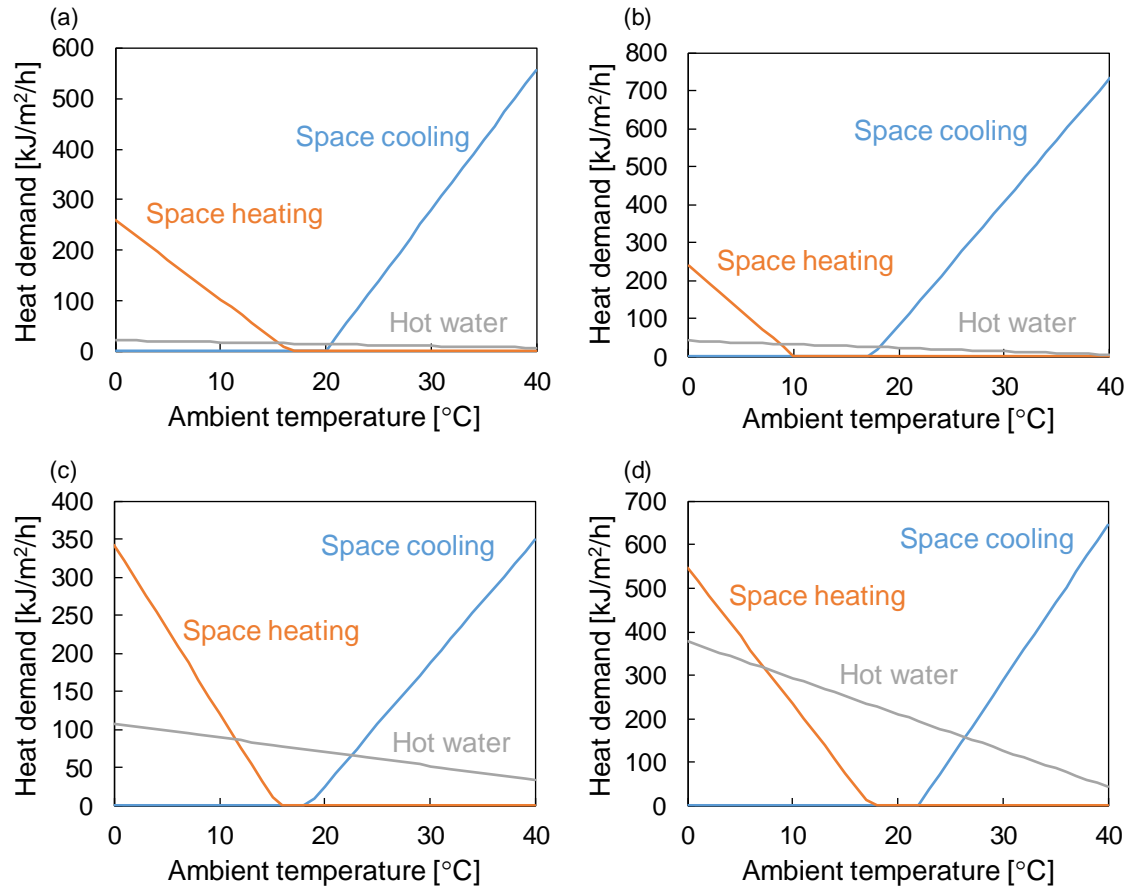


Figure 3-7. Relation between heat demand and ambient temperature [116,117].

Adapted from [ii]. (a) Offices. (b) Stores. (c) Hotels. (d) Hospitals.

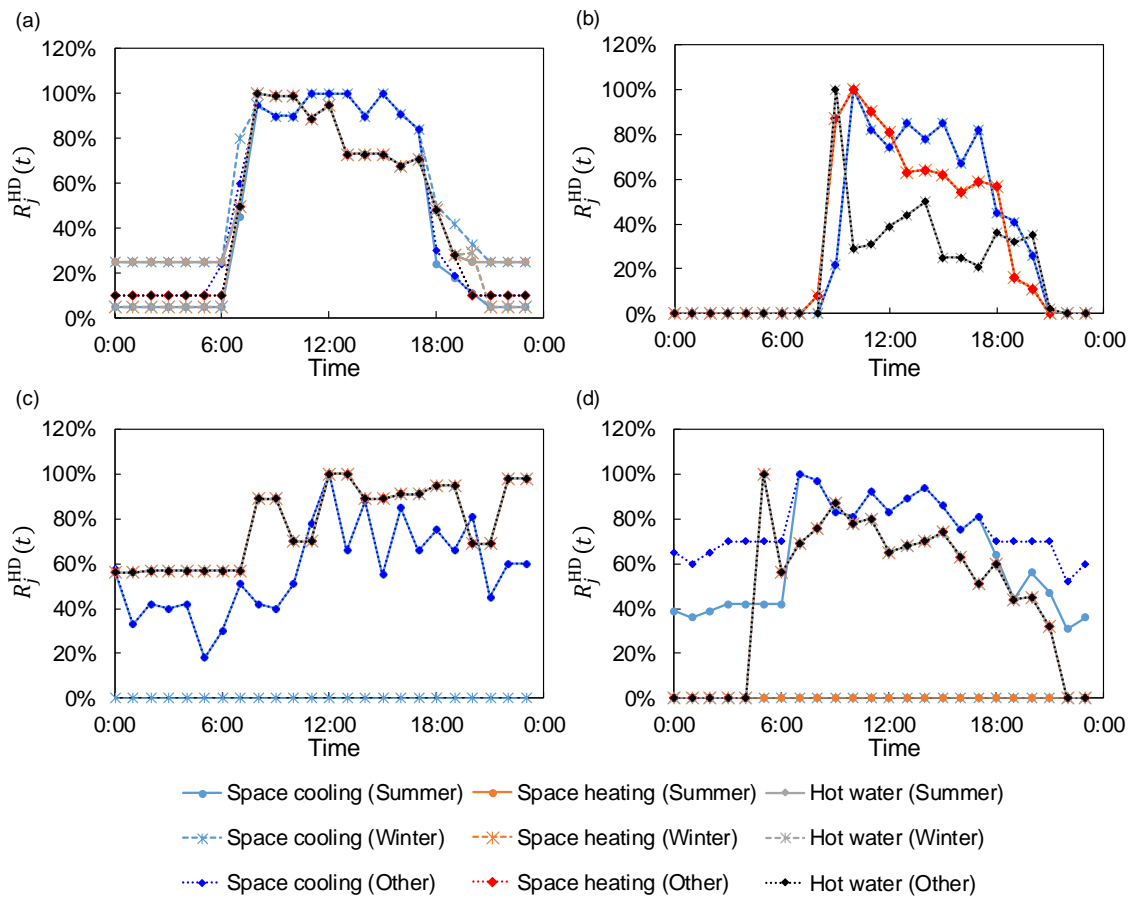


Figure 3-8.  $r_j^{HD}(t)$ , ratio of heat demand to maximum heat demand in a day [117]. Adapted from [ii]. (a) Offices. (b) Stores. (c) Hotels. (d) Hospitals.

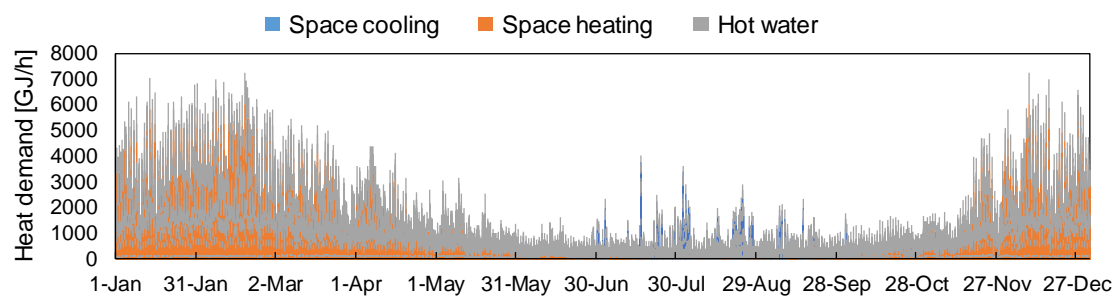


Figure 3-9. Estimated heat demand. Adapted from [ii].

### 太陽光発電による発電量

太陽光発電が導入された場合、電力の需給バランスを保つため、日本ではまず火力発電の出力制御が行われる[11]。TESを導入した熱電供給システムも出力調整能力がある

ため、太陽光発電の出力に合わせて出力調整することが望ましい。太陽光発電に合わせて出力調整能力を調べるため、太陽光発電の出力を日射量と導入ポテンシャルから推算し、その出力分だけ売電量を下げることが検討した。本章では、気候は北海道釧路市で、愛知県春日井市の規模の地域に製紙工場に導入することを検討している。太陽光発電による発電量の変動を、釧路の平均年の日射量[119]と、北海道の導入ポテンシャル[80]から推定し、北海道と春日井市の面積[83]で按分することで設定した製紙工場周辺の太陽光発電による発電量  $\dot{E}^{PV}$  を Figure 3-10 に示す。

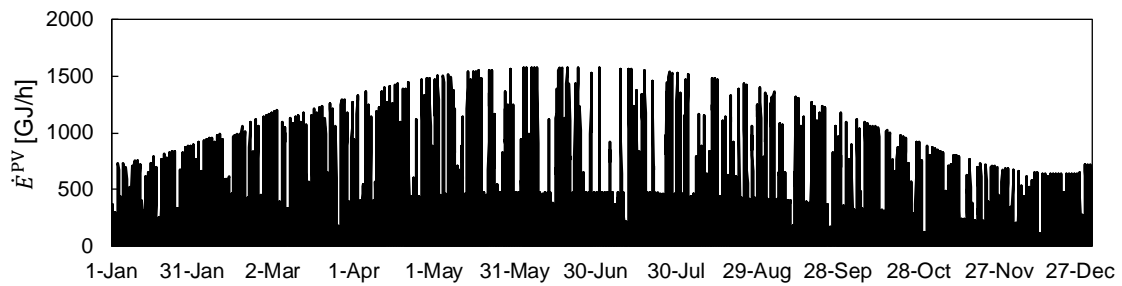


Figure 3-10. Estimated power generation by PV around the paper mill.

### 3.2.3. エネルギー収支シミュレーションで用いた数式

変動性再エネを利用した熱電供給設備を持つ工場でのエネルギー収支を計算するために数式として表した（数式に用いた文字の意味は **Nomenclature** も参照のこと）。 $E^{\text{grid}}$  と  $Q^{\text{vicinity}}$  は、それぞれ売電量と売熱量の一年間の合計である。

$$E^{\text{grid}} = \sum_t \dot{E}^{\text{grid}}(t) \quad (3-2)$$

$$Q^{\text{vicinity}} = \sum_t \dot{Q}^{\text{vicinity}}(t) \quad (3-3)$$

$\dot{E}^{\text{grid}}(t)$  と  $\dot{Q}^{\text{vicinity}}(t)$  は、それぞれ単位時間当たりの売電量と売熱量である。売熱量は、熱需要に応じて変化し、 $\dot{Q}^{\text{vicinity}}(t)$  は、熱需要  $\dot{Q}^{\text{HD}}(t)$  と熱需要に対する売熱量の比  $r^{\text{vicinity}}$  の積で表される。

$$\dot{Q}^{\text{vicinity}}(t) = r^{\text{vicinity}} \dot{Q}^{\text{HD}}(t) \quad (3-4)$$

$\dot{Q}^{\text{HD}}(t)$  は 3.2.2 章の 地域の熱需要 で示した通り地域の気温から決まる値であるため、数式(3-3)と(3-4)から、 $Q^{\text{vicinity}}$  の最大値は  $r^{\text{vicinity}}$  を最大化することで求められる。

PMP での電力と熱の需要はそれぞれ  $\dot{E}^{\text{paper}}(t)$  と  $\dot{Q}_{l.p.}^{\text{steam}}(t)$  で表され、Figure 3-4 の  
 操業スケジュールに示した紙の生産量  $\dot{P}_i(t)$  の変動から計算される。

$$\dot{E}^{\text{paper}}(t) = \sum_i p_i^{\text{elec}} \dot{P}_i(t), \quad (3-5)$$

$$\dot{Q}_{l.p.}^{\text{steam}}(t) = \sum_i p_{i,l.p.}^{\text{steam}} \dot{P}_i(t). \quad (3-6)$$

式(3-6)の PMP で用いられる低圧蒸気の圧力は 1.2 と 0.25 MPa である。タービンの主蒸気となる高圧蒸気は 10 MPa とし、蒸気量は式(3-7)に示したように発電量から計算した。低圧蒸気は抽気復水タービンで抽出されるとし、抽気量は式(3-8)から求めた。動力設備の部分負荷効率是一定とし、定格出力と同等とした。

$$\dot{Q}_{h.p.}^{\text{m-turbine}}(t) = t_{h.p.}^{\text{main}} \{ \dot{E}^{\text{paper}}(t) + \dot{E}^{\text{grid}}(t) \}. \quad (3-7)$$

$$\dot{Q}_{l.p.}^{\text{e-turbine}}(t) = t_{l.p.}^{\text{ex}} \{ \dot{E}^{\text{paper}}(t) + \dot{E}^{\text{grid}}(t) \}. \quad (3-8)$$

製紙工場では、復水とドレンはそれぞれタービンと PMP から回収され、再使用される。回収プロセスでの蒸発によるロスを除き、回収できた復水とドレンのエンタルピー  $\dot{Q}^{\text{drain}}(t)$  と  $\dot{Q}^{\text{con}}(t)$  は式(3-9)と(3-10)から計算した。

$$\dot{Q}^{\text{drain}}(t) = \sum_{l.p.} \{ q_{l.p.}^{\text{drain}} \dot{Q}_{l.p.}^{\text{steam}}(t) \} \quad (3-9)$$

$$\dot{Q}^{\text{con}}(t) = t^{\text{con}} \{ \dot{E}^{\text{paper}}(t) + \dot{E}^{\text{grid}}(t) \} \quad (3-10)$$

製紙工場と地域の総熱需要  $\dot{Q}^{\text{dem}}(t)$  は、式(3-11)により求めた。低圧蒸気の不足は、スチームヘッダーからの蒸気で補った。 $\dot{Q}^{\text{sup}}(t)$  は供給される熱量であり、WEC<sub>th</sub>からの風力由来の熱量  $\dot{Q}_{\text{WECth}}^{\text{wind}}(t)$  と、ボイラや燃焼炉での燃料由来の熱量  $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  の和で求められる（式(3-12)）。 $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  は、各燃料からの熱量の和で求められ（式(3-13)）、その上限は CF のボイラの出力と同等とした。

$$\begin{aligned} \dot{Q}^{\text{dem}}(t) = & \dot{Q}_{h.p.}^{\text{m-turbine}}(t) + \sum_{l.p.} \{ \dot{Q}_{l.p.}^{\text{steam}}(t) - \dot{Q}_{l.p.}^{\text{b-turbine}}(t) \} + \dot{Q}^{\text{vicinity}}(t) \\ & - \dot{Q}^{\text{drain}}(t - \Delta t) - \dot{Q}^{\text{con}}(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (3-11)$$

$$\dot{Q}^{\text{sup}}(t) = \dot{Q}_{\text{WECth}}^{\text{wind}}(t) + \dot{Q}^{\text{fuel}}(t) \quad (3-12)$$

$$\dot{Q}^{\text{fuel}}(t) = \dot{Q}_{\text{BL}}^{\text{fuel}}(t) + \dot{Q}_{\text{WDF}}^{\text{fuel}}(t) + \dot{Q}_{\text{coal}}^{\text{fuel}}(t) + \dot{Q}_{\text{HO}}^{\text{fuel}}(t) + \dot{Q}_{\text{NG}}^{\text{fuel}}(t) \quad (3-13)$$

製紙工場での使用される燃料の入手可能性について、黒液や廃棄物燃料といった低炭素燃料は、BKP 製造や市場の状態により使用が制限されるが、化石燃料由来の GHG 排出



量を削減できるため、化石燃料より黒液や廃棄物燃料を優先して使用することが望ましい。

CF の場合、TES がいないため、 $\dot{Q}^{\text{sup}}(t)$  と  $\dot{Q}^{\text{dem}}(t)$  は等しくなる必要がある。エネルギーの需給バランスを保つため、式(3-14)を満たすように、 $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  を調整した。

$$\dot{Q}^{\text{fuel}}(t) = \dot{Q}^{\text{dem}}(t) \quad (3-14)$$

一方で、TF の場合、TES には高温タンクと低温タンクがあり、熱媒である溶融塩を貯蔵している。時刻  $t$  における各タンクの溶融塩の量はそれぞれ  $M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$  と  $M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$  で表され、その合計は  $M^{\text{TES}}$  で表される。

$$M^{\text{TES}} = M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t) + M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t) \quad (3-15)$$

低温タンク中の溶融塩は、 $\dot{Q}^{\text{sup}}(t)$  によって加熱され、高温タンクに送られる。高温タンク中の溶融塩は、熱交換器を通して蒸気を生成し、冷却後に低温タンクに戻される。高温タンクと低温タンクの入側の温度はそれぞれ  $580^\circ\text{C}$  と  $290^\circ\text{C}$  に設定した。溶融塩の熱流量と質量流量は陽解法で求めた。時刻  $t$  における蓄熱可能な熱量  $Q_{\text{max}}^{\text{TES}}(t)$  は、式(3-16)で表したように、溶融塩のエンタルピー差と、 $M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$  と低温タンクの最低溶融塩量  $M_{\text{cold\_min}}^{\text{TES}}$  の差を掛け合わせることで求められる。 $M_{\text{cold\_min}}^{\text{TES}}$  は、Table 3-1 に示したタンク内で最低限必要とされる溶融塩の高さから求められる。

$$Q_{\text{max}}^{\text{TES}}(t) = \left\{ h(580^\circ\text{C}) - h\left(T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\right) \right\} \left\{ M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) - M_{\text{cold\_min}}^{\text{TES}} \right\} \quad (3-16)$$

$h(T)$  は温度  $T$  における溶融塩のエンタルピーであり、 $T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$  は低温タンクの溶融塩温度である。 $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  は、 $\text{WEC}_{\text{th}}$  で得られる  $\dot{Q}_{\text{WEC}_{\text{th}}}^{\text{wind}}(t)$  (3.2.2 風力参照) と、ドレンと復水から得られる熱量  $\dot{Q}^{\text{drain}}(t)$  と  $\dot{Q}^{\text{con}}(t)$  を、 $Q_{\text{max}}^{\text{TES}}(t)$  から除いた熱量と同じになるように制御される。 $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  は、蓄熱量が TES の容量を超えないように制御されるため、 $\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$  がゼロになることもある (式(3-17))。

$$\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)\Delta t \leq Q_{\text{max}}^{\text{TES}}(t) - \dot{Q}_{\text{WEC}_{\text{th}}}^{\text{wind}}(t)\Delta t - \dot{Q}^{\text{drain}}(t - \Delta t)\Delta t - \dot{Q}^{\text{con}}(t - \Delta t)\Delta t \quad (3-17)$$

低温タンクから高温タンク、高温タンクから低温タンクに移動する溶融塩の質量流量  $\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t)$  と  $\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t)$  は、式(3-18)と(3-19)に示すようにそれぞれ  $\dot{Q}^{\text{sup}}(t)$  と  $\dot{Q}^{\text{dem}}(t)$  から計算される。

$$\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t) = \frac{\dot{Q}^{\text{sup}}(t)}{h(580^\circ\text{C}) - h(T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t))} \quad (3-18)$$

$$\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t) = \frac{\dot{Q}^{\text{dem}}(t)}{h(T_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t) - h(290 \text{ }^{\circ}\text{C})} \quad (3-19)$$

$M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$  と  $M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$  は、式(3-20)と(3-21)に示したように、タンクの入口と出口における溶融塩の流量から求められるが、溶融塩の移動量は式(3-22)と(3-23)に示したような制限を設けた。

$$M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t) = M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) + \dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - \dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t \quad (3-20)$$

$$M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t) = M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) + \dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - \dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t \quad (3-21)$$

$$\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t)\Delta t \leq M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) \quad (3-22)$$

$$\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t)\Delta t \leq M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) \quad (3-23)$$

高温タンクと低温タンクに蓄えられた熱量  $Q_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$  と  $Q_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$  は、移動した/してきた溶融塩が持つエンタルピーと、タンク壁からの放熱量  $\dot{Q}_{\text{hot}}^{\text{leakage}}(t)$  と  $\dot{Q}_{\text{cold}}^{\text{leakage}}(t)$  を用いて求めた（式(3-24)と(3-25)）。タンク壁からの放熱量は、溶融塩温度と気温の差と、Table 3-1 に示した熱伝導率と熱伝達率を用いて計算した。

$$Q_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t) = Q_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) + h(580 \text{ }^{\circ}\text{C})\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - h(T_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t - \Delta t))\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - \dot{Q}_{\text{hot}}^{\text{leakage}}(t - \Delta t)\Delta t \quad (3-24)$$

$$Q_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t) = Q_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t) + h(290 \text{ }^{\circ}\text{C})\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - h(T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t - \Delta t))\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t - \Delta t)\Delta t - \dot{Q}_{\text{cold}}^{\text{leakage}}(t - \Delta t)\Delta t \quad (3-25)$$

各タンクの溶融塩の時刻  $t$  におけるエンタルピー  $h(T_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t))$  と  $h(T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t))$  は、式(3-26)と(3-27)で示したように、溶融塩の熱量と量から求められる。各タンクの溶融塩のエンタルピーがわかることで、式(3-28)で示した関係から溶融塩の温度を求めることができる。

$$h(T_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)) = \frac{Q_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)}{M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)} \quad (3-26)$$

$$h(T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)) = \frac{Q_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)}{M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)} \quad (3-27)$$

$$h(T) = C_p T + b \quad (3-28)$$

以上の計算は、1月1日の0:00から12月31日の24:00まで、1時間単位で計算した。1年以上連続的に紙を生産できるようにするため、1月1日の0:00の熔融塩の量と温度は、12月31日の24:00と同じになるように設定した。1年を通した蓄熱量が同じになるようにした時の売電・売熱量の計算方法を **Figure 3-11** に示す。TES の容量を設定した時の売電または売熱量を求める。売電または売熱量と、1月1日の0:00の高温・低温タンクの熔融塩の量と温度の仮の値をおき、その時の1年間の蓄熱量の変化を計算し、蓄熱量の結果によって、売電または売熱量と、1月1日0:00の熔融塩の量・温度を設定し直す。蓄熱量の変化の計算結果が、年間を通して蓄熱量が増加または変わらずに、蓄熱量が常に0以上の場合は、売電または売熱量を増加させ、12月31日の24:00の熔融塩の温度を1月1日の0:00の値として代入する（熔融塩の量を変えない）。年間を通して蓄熱量が減少するが常に0以上または蓄熱量は増加するが0未満になる場合は、売電または売熱量を変えずに12月31日24:00の熔融塩の量と温度を1月1日0:00に代入する。年間を通して蓄熱量が減少し0未満になるまたは蓄熱量が極端に減少するなどなどの異常終了となった場合は、売電または売熱量を減少させる。売電または売熱量と、1月1日0:00の熔融塩の量・温度を設定して蓄熱量を計算することを繰り返し、年間を通して蓄熱量が変わらず、蓄熱量が0になる時がある売電または売熱量の値を求める。これが設定した TES の容量における最大の売電または売熱量であり、本研究では、この値を売電または売熱量として表した。売電と売熱の両方をした場合は、売熱量の値を仮定し、仮定した量の売熱を行った上で、売電できる量の最大値を求めた（3.2.4 項も参照）。



Figure 3-11. The way to calculate the amount of power or heat selling.

### 3.2.4. シミュレーション条件および導入シナリオの設定

紙製品と動力施設のライフサイクルシステムバウンダリは 3.2.1 項で定義した通りであり、機能単位は、Table 3-2 に示した製紙工場の年間の生産量とした。LCA のフォアグラウンドデータは、本研究で構築したモデルのエネルギー収支のシミュレーションによって、化石燃料、材料、化学物質のバックグラウンドデータは、LCA のためのデータベースである LCI データベース IDEA version 2.3[120]および JLCA-LCA データベース 2020 年度 1 版[121]から抽出した。売電は、日本の電力供給の中間電源として、稼働率

の安定している石炭火力発電を代替するとした。売熱は、重油、都市ガスの消費、熱需要による電力を代替するとした。冷暖房機器の COP は、機器の種類に関わらず、過大評価を避けるため、一般的に冷暖房機器の中で COP が低い吸収式冷凍機の COP に相当する 0.7 とした[12]。本研究では、製紙工場をエネルギー拠点として設計する初期段階に焦点を当て、熱量（ジュール）ベースでシミュレーションを行ったため、売熱用の配管のサイズは考慮せず、配管設置による環境負荷も LCA から除外した。

燃料の使用量は、ボイラの能力から計算し、ボイラの出力を 50～100%の範囲で変化させることとした。加熱炉の能力はボイラと同じと仮定した。黒液ボイラ／加熱炉で、黒液を通年で使用するために、BKP ラインの長期休止中や休止前に黒液の消費量を下げ、黒液ボイラ／加熱炉で黒液が不足する場合は重油を利用するとした。黒液の燃焼による GHG 排出量は、黒液に含まれる炭素が木材の成長過程で吸収された炭素であるため 0 とした。廃棄物ボイラでは補助燃料として石炭が使用されているため[122]、廃棄物ボイラ／加熱炉の出力の 10%が石炭由来であると仮定した。廃棄物の使用量は市場で入手可能な量に限られているが、本研究では廃棄物が十分に入手可能であると仮定した。廃棄物ボイラで複数種類の廃棄物を混焼する場合は、それぞれの廃棄物の発熱量の割合に比例して配分した。

風力を利用するための  $WEC_{th}$  は、2.1MW<sub>e</sub>級の定格出力を持つ風車の数を変更することで導入量を調整した。導入量は、日本の大規模なウィンドファームと同等の 100.8 MW<sub>e</sub>を最大の導入量とし、その他に、2.1MW<sub>e</sub>（風車 1 基）と、ウィンドファームの 1/2 倍に当たる 50.4 MW<sub>e</sub>を検討した。TES の導入規模は 8～4500 kt とし、8～15 kt は 1 kt ずつ、20～100 kt は 10 kt ずつ、100～500 kt は 50 kt ずつ、500 kt 以上は 250 kt ずつ 4500 kt まで検討した。TES の最小導入量を 8 kt としたのは製紙工場の操業に最低限必要なためで、TES を 4500 kt 以上導入しても売電・売熱量は減少し LC-GHG は増加したため TES の最大導入量は 4500 kt とした（3.3.2 項参照）。製紙工場外に  $WT_{th}$ -ES を導入する場合には、TES の導入量は 2～300 kt とし、2～10 kt は 1 kt ずつ、10～30 kt は 2 kt ずつ、30～100 kt は 10 kt ずつ、100～300 kt は 25 kt ずつ検討した。ただし、売電時に TES を 2 kt 導入した場合には、通年で一定電力を売電し続けることができなかったため除外した。

T-PMES や  $WT_{th}$ -ES からの売電量は、式(3-29)に示すように一定とした。

$$\dot{E}^{grid}(t) = E_{const}^{grid} \quad (3-29)$$

製紙工場周辺に太陽光発電を導入する場合（3.3.6 項参照）は、 $WEC_{th}$  を  $100.8 MW_e$  導入した条件下で、式(3-30)に示すように、売電量を太陽光発電による出力分削減して売電することとした。

$$\dot{E}^{grid}(t) = E_{const}^{grid} - \dot{E}^{PV} \quad (3-30)$$

太陽光発電による出力が多く、 $E_{const}^{grid}$  より  $\dot{E}^{PV}$  が大きくなるときには  $\dot{E}^{grid}(t)$  は 0 とし、T-PMES や  $WT_{th}$ -ES からの売電はしないこととした。

導入シナリオとして、製紙工場の内外に  $WEC_{th}$  を導入する場合を比較するため、Table 3-2 に示した 21 種類のシナリオを設定した。シナリオ S1 は現状の製紙工場でベースシナリオとした。シナリオ S2～S12 は売電、シナリオ S13～S21 は売熱をした場合である。TES のない現状の製紙工場である C-PMES と、TES を導入した T-PMES で、T-PMES では  $WEC_{th}$  の有無を比較し、それぞれのシナリオで、製紙工場から売電または売熱をする場合としない場合を設定した。 $WEC_{th}$  の導入量は  $100.8 MW_e$  とし、製紙工場の内外の両方に導入する場合は  $50.4 MW_e$  ずつ導入し、総導入量が  $100.8 MW_e$  となるようにした。製紙工場に導入する TES は、50～500 kt で 50 kt ずつ検討した。製紙工場外の  $WT_{th}$ -ES に導入する TES は、LC-GHG が最小となる場合とし、売電時は 30 kt、売熱時は 24 kt とした（3.3.3 項の結果を参照）。製紙工場外に  $WT_{th}$ -ES がある時は、TES の総導入量を同じにするため、製紙工場内に導入する TES を売電時は 30 kt、売熱時は 24 kt ずつ減らした。

製紙工場から売電と売熱の両方をする場合は、 $WEC_{th}$  を  $100.8 MW_e$  導入した条件下で、熱需要に対する売熱量の割合である  $r^{vicinity}$  の値を仮定した時に、可能となる売電量の最大値を求めた。3.3.2 項の結果より、売熱のみをした場合の売熱量の最大値が TES を 4,000 kt 導入した時の 3,952 TJ であり、この時の  $r^{vicinity}$  が 40.6%であった。そのため、売電と売熱の両方した時の検討では、 $r^{vicinity}$  が 10%、20%、30%を仮定した場合の売電量を求めた。

Table 3-2. Scenario settings. Adapted from [i].

Scenario	Energy systems at the paper mill					Outside the paper mill (WT <sub>th</sub> -ES)	
	C-PMES	T-PMES	WEC <sub>th</sub>	Power selling	Heat selling	Power selling 30 kt-TES	Heat selling 24 kt-TES
S1	✓						
S2	✓			✓			
S3	✓					✓*d	
S4	✓			✓		✓*d	
S5		✓*a					
S6		✓*a		✓			
S7		✓*b				✓*d	
S8		✓*b		✓		✓*d	
S9		✓*a	✓*d				
S10		✓*a	✓*d	✓			
S11		✓*b	✓*e			✓*e	
S12		✓*b	✓*e	✓		✓*e	
S13	✓				✓		
S14	✓						✓*d
S15	✓				✓		✓*d
S16		✓*a			✓		
S17		✓*c					✓*d
S18		✓*c			✓		✓*d
S19		✓*a	✓*d		✓		
S20		✓*c	✓*e				✓*e
S21		✓*c	✓*e		✓		✓*e

\*a: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 kt-TES

\*b: 20, 70, 120, 170, 220, 270, 320, 370, 420, 470 kt-TES

\*c: 26, 76, 126, 176, 226, 276, 326, 376, 426, 476 kt-TES

\*d: 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>

\*e: 50.4 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>

### 3.3.製紙工場における蓄熱技術と風力の導入評価

#### 3.3.1. エネルギー収支のシミュレーション

3.2 節で述べたエネルギーシステムを導入した製紙工場のエネルギーフローをシミュレーションした。一例として、Figure 3-12 に 40 kt-TES と 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub> を製紙工場に導入（シナリオ S10）し、売電した場合の結果を示す。Figure 3-12 (a)は製紙工場のエネルギー需要と売電量、TES タンク内の溶融塩量を、(b)は燃料消費量を示しており、この例での売電量は 61.3 MW<sub>e</sub>であった。PMP で使用される電力と蒸気は、Figure 3-4 に示した紙・パルプの生産量に応じて変動した。長期休止による生産ラインの停止時は、PMP のエネルギー需要は減少するが、WEC<sub>th</sub> や加熱炉からの熱は蓄熱され続けるため、高温タンクの蓄熱量が大幅に増加した。溶融塩量が高温タンクの上限に達すると、TES の入熱量を抑えるために加熱炉の出力を低下させ、生産ラインの再開により高温タンクの溶融塩量は減少した（Figure 3-12 (b)参照）。売電量を最大化するためには、高温タンクの溶融塩量をすべて使用し、式(3-22)の両辺が同値になる時があるが、これは 10 月 16 日に起こった（Figure 3-12 (a)参照）。

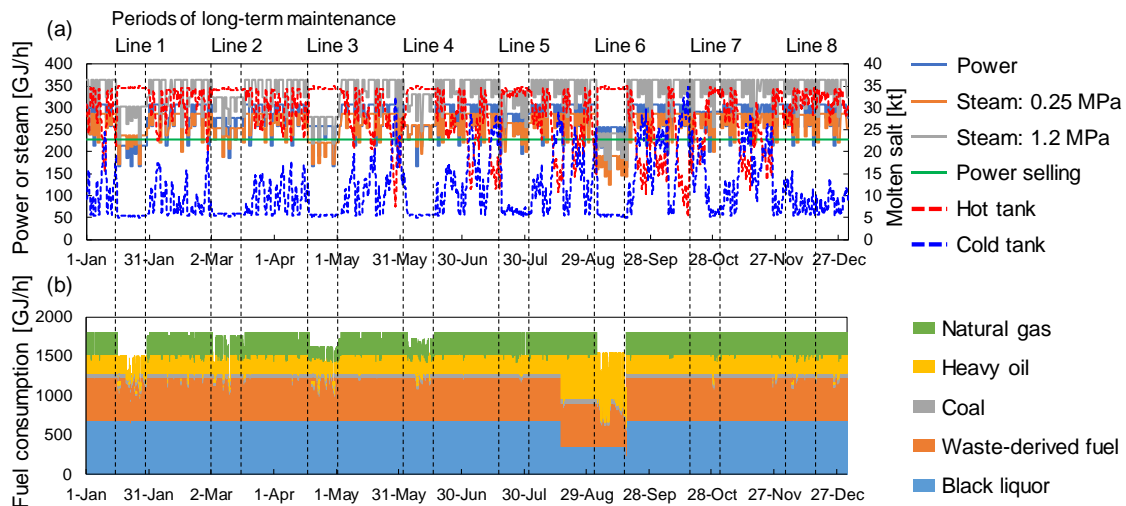


Figure 3-12. Hourly variation in energy flows at the paper mill with 40 kt-TES and 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>. Adapted from [i,ii]. (a) Energy demand and stored heat. (b) Fuel consumption.



### 3.3.2. 蓄熱技術と風力の導入規模の影響評価

製紙工場からの売電量、売熱量、LC-GHG を、TES、WEC<sub>th</sub> の導入量を変えた場合について比較した。例として、製紙工場に TES と WEC<sub>th</sub> を導入し売電した時のシナリオ 6 と 10、売熱した時のシナリオ 16 と 19 の結果を示す。Figure 3-13 に、売電量と売熱量の結果を示す。売電時には 400~450 kt、売熱時には 3,750~4,000 kt の TES を導入したとき、それぞれ売電量、売熱量が最大となった。TES が小さい時は、燃烧炉や WEC<sub>th</sub> の発熱量に対して蓄熱可能な熱量が少ないが、TES の規模を大きくし TES の年間の総入熱量が増加させると、より多くの熱エネルギーを売電・売熱用の電力・熱に変換できた。WEC<sub>th</sub> を導入すると、売電・売熱量は増加したが、TES が小規模である時（売電時は 8~11 kt、売熱時は 8~10 kt）は、WEC<sub>th</sub> の導入量に関係なく売電・売熱量は同じになった。これは、TES が小規模で WEC<sub>th</sub> を導入しても年間の TES の総入熱量が増加しないためである。ただし、化石燃料より風力由来の熱エネルギーの蓄熱が優先されるため、WEC<sub>th</sub> の導入により燃料消費量は減少した。TES の導入量が過剰な場合は、多量の溶融塩の顕熱が必要になるが、TES の入熱量は燃烧炉と WEC<sub>th</sub> の能力によって上限があるため、溶融塩の温度が低下しやすく、売電・売熱量が低下した。

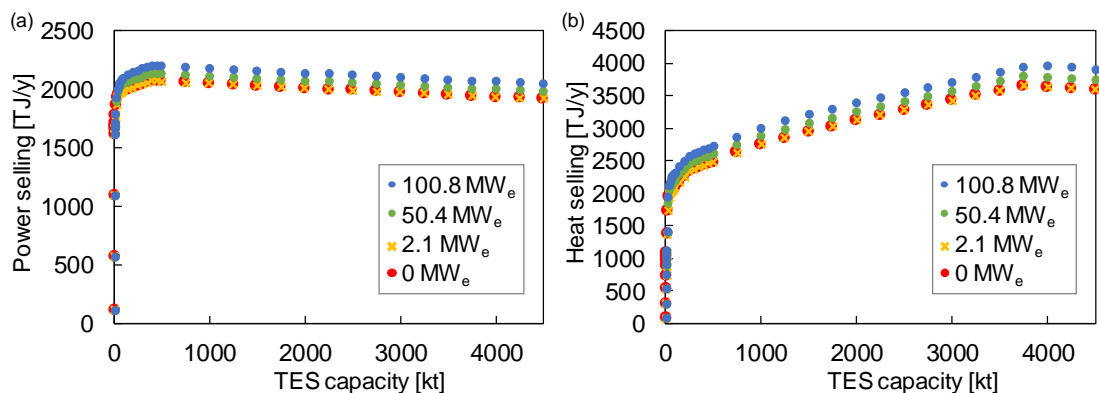


Figure 3-13. The amount of power or heat selling with various TES capacities in the paper mill. Adapted from [i, ii]. (a) Power selling. (b) Heat selling.

LC-GHG について、売電時を Figure 3-14 (a)に、売熱時を Figure 3-14 (b)に示す。TES と WEC<sub>th</sub> の導入により、導入設備の建設および廃棄による GHG が発生するが、売電時には石炭火力発電を、売熱時には化石燃料と電力由来の熱による GHG を削減できるため、TES や WEC<sub>th</sub> のない C-PMES より LC-GHG は削減できた。過剰な TES を導入すると、導入設備の建設・廃棄による GHG 排出量が、売電や売熱による GHG 削減量を上回り、LC-GHG は増加した。売電時には 40 kt、売熱時には 30 kt の TES を導入した時

に、売電や売熱による GHG の削減量が TES や  $WEC_{th}$  の建設・廃棄による GHG 排出量よりも十分に大きくなり、LC-GHG が最小となった。TES の導入量が小さく、 $WEC_{th}$  を導入しても売電・売熱量が増加しなかった場合も、風力の利用により化石燃料の消費を抑えられ、LC-GHG は減少した。TES を過剰に導入すると、TES の建設や廃棄による GHG 排出量が増加し、売電・売熱量も減少して GHG 削減量が減少するため、LC-GHG が増加した。

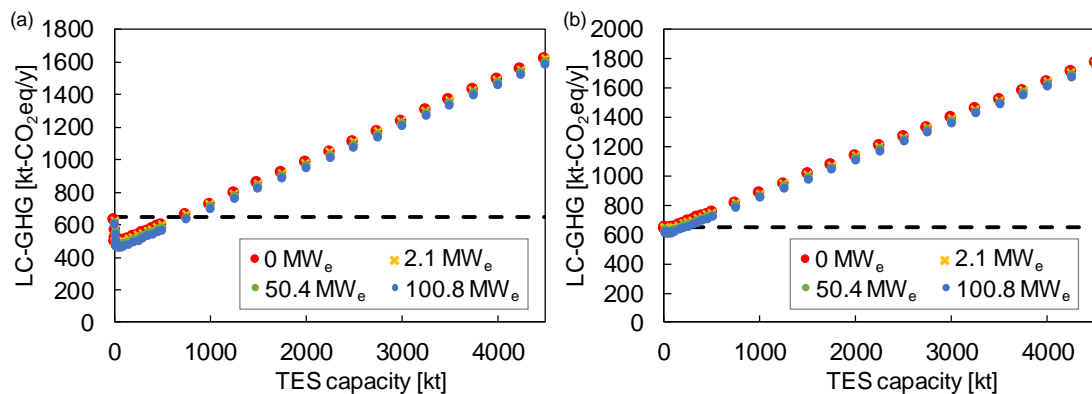


Figure 3-14. LC-GHG of installing various TES capacities in the paper mill. The dotted line represents LC-GHG from C-PMES. Adapted from [i, ii]. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

### 3.3.3. 製紙工場外に風力熱発電を導入した場合

製紙工場外に  $WT_{th}$ -ES を導入した時の売電量、売熱量、LC-GHG について、TES、 $WEC_{th}$  の導入量を変えて比較した。Figure 3-15 に、売電量と売熱量の結果を示す。売電量の最大値は、 $WEC_{th}$  を 2.1 MWe 導入した時には TES6 kt で 1.8 TJ、50.4 MWe の時は 125 kt で 57 TJ、100.8 MWe の時は 250 kt で 115 TJ となった。売熱量の最大値は、 $WEC_{th}$  を 2.1 MWe 導入した時には TES5 kt で 4.7 TJ、50.4 MWe の時は 80 kt で 151 TJ、100.8 MWe の時は 302 kt で 302 TJ となった。 $WEC_{th}$  の増加量に対して、売電・売熱量の増加量の方が多く、複数の  $WEC_{th}$  を組み合わせの方が蓄熱された熱エネルギーを効率的に利用できることがわかった。TES の導入量が過剰な場合は、3.3.2 項で述べた現象と同様に、熔融塩の温度が低下しやすくなり、売電・売熱量が低下した。

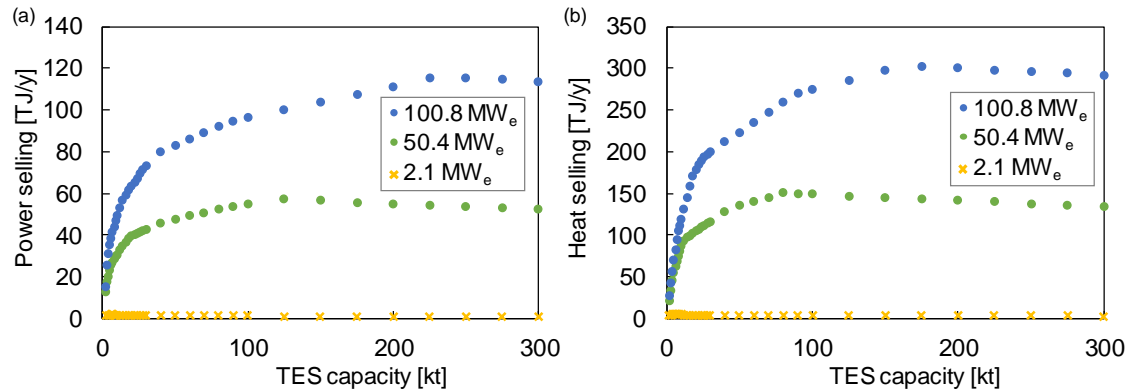


Figure 3-15. The amount of power or heat selling with various TES capacities in WT<sub>th</sub>-ES. (a) Power selling. (b) Heat selling.

WT<sub>th</sub>-ES の LC-GHG を Figure 3-16 に示す。売電時には、WEC<sub>th</sub> を 2.1 MW<sub>e</sub> 導入した時には TES3 kt、50.4 MW<sub>e</sub> の時は 18 kt、100.8 MW<sub>e</sub> の時は 30 kt で LC-GHG が最小となった。WEC<sub>th</sub> が 50.4 MW<sub>e</sub> と 100.8 MW<sub>e</sub> の時は、WT<sub>th</sub>-ES から売電された電力が石炭火力発電を代替することで、LC-GHG が負となった。売電時には、WEC<sub>th</sub> を 2.1 MW<sub>e</sub> 導入した時には TES2 kt、50.4 MW<sub>e</sub> の時は 12 kt、100.8 MW<sub>e</sub> の時は 24 kt で LC-GHG が最小となった。売熱時も WEC<sub>th</sub> が 50.4 MW<sub>e</sub> と 100.8 MW<sub>e</sub> の時に、LC-GHG が負となった。TES を過剰に導入した場合は、3.3.2 項と同様に TES の建設や廃棄による GHG 排出量が増加し、LC-GHG は増加した。

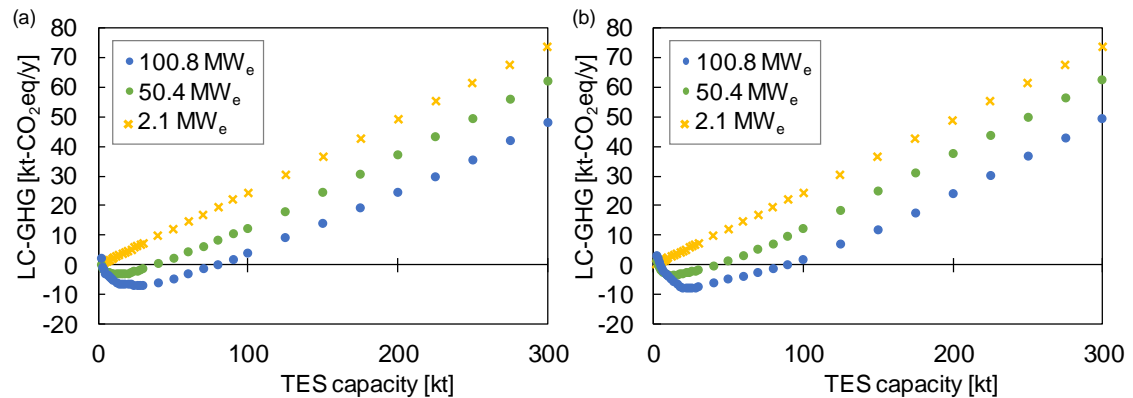


Figure 3-16. LC-GHG of installing various TES capacities in WT<sub>th</sub>-ES. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

### 3.3.4. 導入シナリオの比較

日本の大規模な風力発電所と同等の 100.8 MW<sub>e</sub>級の WEC<sub>th</sub>を設置した場合に、Table 3-2 で設定したシナリオの LC-GHG を Figure 3-17 と Figure 3-18 に示す。TES は 0 から 500 kt まで 50 kt ずつで変化させた。ベースのシナリオ S1 と比較して、売電や売熱をするために TES や WEC<sub>th</sub>を導入し、追加の化石燃料を消費することで GHG 排出量は増加したが、売電した電力が石炭火力発電を、売熱した熱は化石燃料由来の熱を代替し、十分な GHG 削減量が得られた場合は LC-GHG が削減できた。売電時の結果は Figure 3-17、売熱時は Figure 3-18 に示す。

Figure 3-17 (a)に、シナリオ S1～S12 の売電量を、Figure 3-17 (b)と(c)に LC-GHG を示す。C-PMES を採用し、売電した時のシナリオは S2～S4 で、LC-GHG は Figure 3-17 (b)に示す。S1 と S2 を比較すると、S2 では燃料消費量を増加させて売電したが、売電による GHG 削減で LC-GHG は削減した。製紙工場外に 2 kt の TES を用いた WT<sub>th</sub>-ES を導入した S3 では、TES と WEC<sub>th</sub>の製造・廃棄による GHG 排出量は増加したが、売電することで削減でき、LC-GHG は S1 より減少した。製紙工場と WT<sub>th</sub>-ES の両方から売電した S4 では、売電量は S2 と S3 の合計となる。S1～S4 では、S4 の LC-GHG が最も小さく、S1 に比べて 23.4%減少した。

シナリオ S5～S8 は、製紙工場に WEC<sub>th</sub>を導入せず TES だけを導入した T-PMES を採用した場合で、LC-GHG は Figure 3-17 (b)に示した。S5 では、製紙工場が自家発電のみで系統へ売電しておらず、WT<sub>th</sub>-ES も導入していないため、売電量は 0 であるため、Figure 3-17 (a)では除いた。S7 では WT<sub>th</sub>-ES のみからの売電したため、売電量は S3 と同じとなった。S5 と S7 の LC-GHG は、製紙工場が売電していないため、S7 の TES が 50 kt 導入された場合を除き、S1 より増加した。製紙工場が売電しない場合、TES の温度を維持するため追加で化石燃料を消費するため、S1 より LC-GHG が増加しやすい。製紙工場から売電した場合は、S6 と S8 に示すように、石炭火力発電由来の GHG を削減でき、LC-GHG は減少した。S5～S8 では、売電量が最も多かった S8 で TES を 50 kt 導入した時が最も小さい LC-GHG を示し、S1 よりも 24.8%少なかった。製紙工場と WT<sub>th</sub>-ES の 2 か所から売電したことで、GHG 削減量が大きくなったためである。

シナリオ S9～S12 では WEC<sub>th</sub>を導入した T-PMES を採用し、LC-GHG は Figure 3-17 (c)に示した。S9 と S11 では製紙工場は売電しておらず、TES を 100 kt 以上導入した時 S1 よりも LC-GHG が増えた。製紙工場が売電した S10 と S12 では、S10 の方が売電量は多くなり、LC-GHG は S10 と S12 の両方で S1 より小さくなった。製紙工場からは売

電しない S5 と S9 を比較すると、S9 の方が風力を利用できたため LC-GHG は少なかった。製紙工場のみから売電した S6 と S10 では、S10 の方が、風力を利用し燃料消費量を削減できた上に売電量も多く、LC-GHG は減少した。WEC<sub>th</sub> を製紙工場外と製紙工場内に導入した S8 と S10 を比較すると、S10 の方が売電量が多く、LC-GHG は少なかった。製紙工場と WEC<sub>th</sub> を組み合わせることで、TES の熔融塩の高温・低温タンク間の循環が活発化して熔融塩の温度が低下しづらくなり売電に利用できる熱エネルギーが増加したためである。WEC<sub>th</sub> を製紙工場の内外の両方に導入した S12 では、S8 と比較して TES100 kt 以上で LC-GHG が少なくなった。TES が 50 kt の時は、売電量は S8 の方が多かったが、S12 の方が燃料消費量が少なく LC-GHG も少なくなった。

Figure 3-18 (a)に、シナリオ S13～S21 の売熱量を、Figure 3-18 (b)と(c)に LC-GHG を示す。検討したシナリオの中で売熱量が最も多かったのは、シナリオ S19 で TES を 500 kt 導入した時であった。売熱時に C-PMES を採用した S13～S15 の LC-GHG は Figure 3-18 (b)に示す。売熱した熱が化石燃料由来の熱を代替でき、S13～S15 のすべてで S1 より LC-GHG は減少した。WEC<sub>th</sub> なしで T-PMES を採用した場合、S16、S17 では TES 50 kt、S18 では TES 100 kt 以下導入した時に、売熱によって十分に GHG を削減でき、S1 より LC-GHG は減少した (Figure 3-18 (c)参照)。WEC<sub>th</sub> を導入した T-PMES を採用した S19～S21 でも、適切な規模の TES (S19 は 200 kt 以下、S20 は 50 kt 以下、S21 は 150 kt 以下) を導入した場合に LC-GHG は減少した。売熱した S13～S21 で最も LC-GHG が少なかったのは、WEC<sub>th</sub> を組み合わせた T-PMES から売熱した S19 で TES 50 kt 導入した時で、S1 よりも 5.6% 少なかった。

すべてのシナリオの中で、TES を 50 kt 導入し売電した S10 の LC-GHG が最も小さく、ベースの S1 と比較して 28.4% 減少した。製紙工場と TES、WEC<sub>th</sub> を組み合わせることで、蓄熱された熱エネルギーを効率よく電気や蒸気に変換することができた。しかし、TES や WEC<sub>th</sub> を導入したからといって、必ずしも GHG 排出量が減少するとは限らない。特に、TES を製紙工場に導入しても、製紙工場から売電・売熱しない場合や、過剰量の TES を導入した場合は、LC-GHG は増加した。

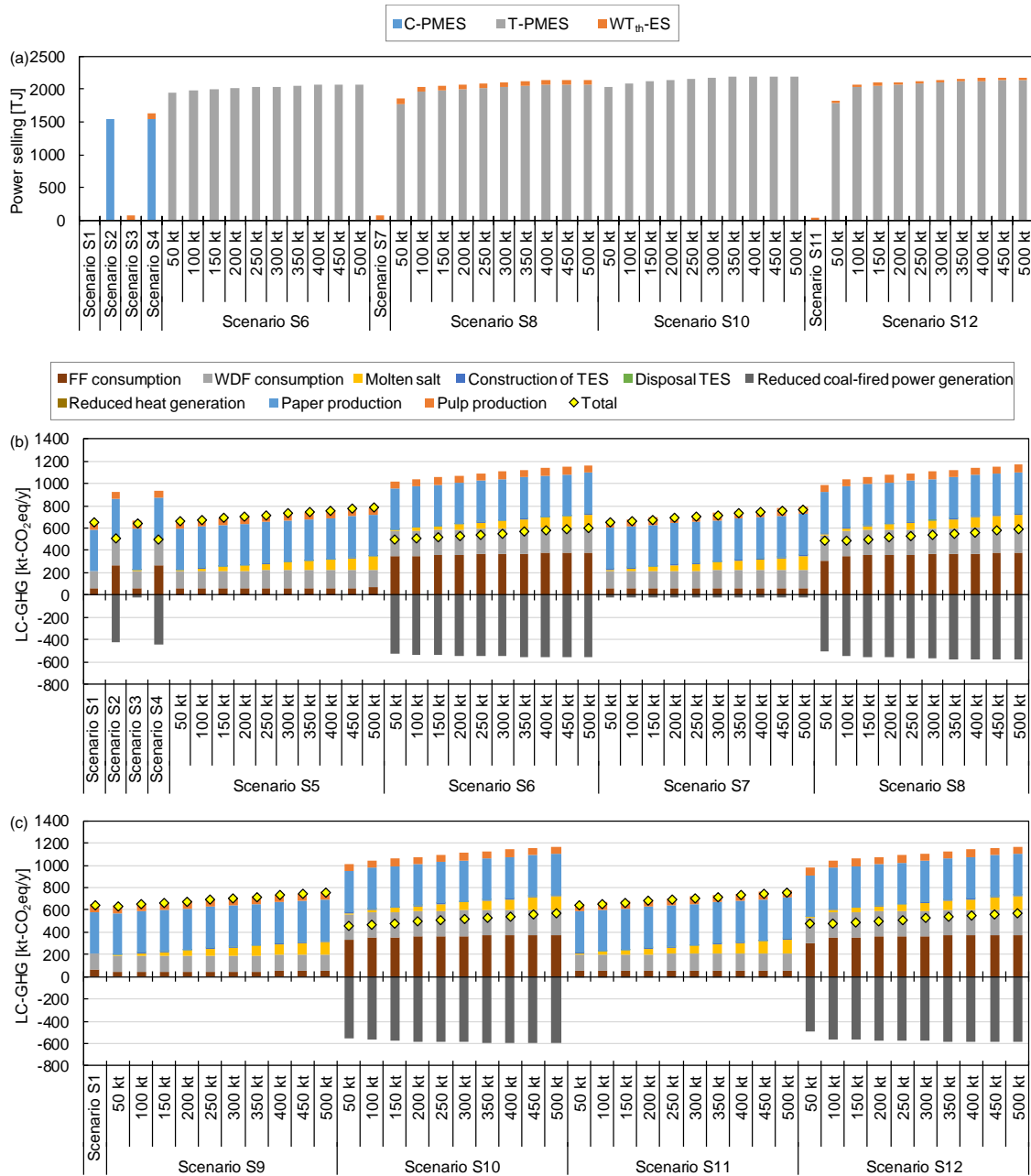


Figure 3-17. Results of scenarios 1–12 with 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>. Adapted from [i]. (a) Power selling. (b) LC-GHG of scenarios 1–8. (c) LC-GHG of scenarios 9–12.

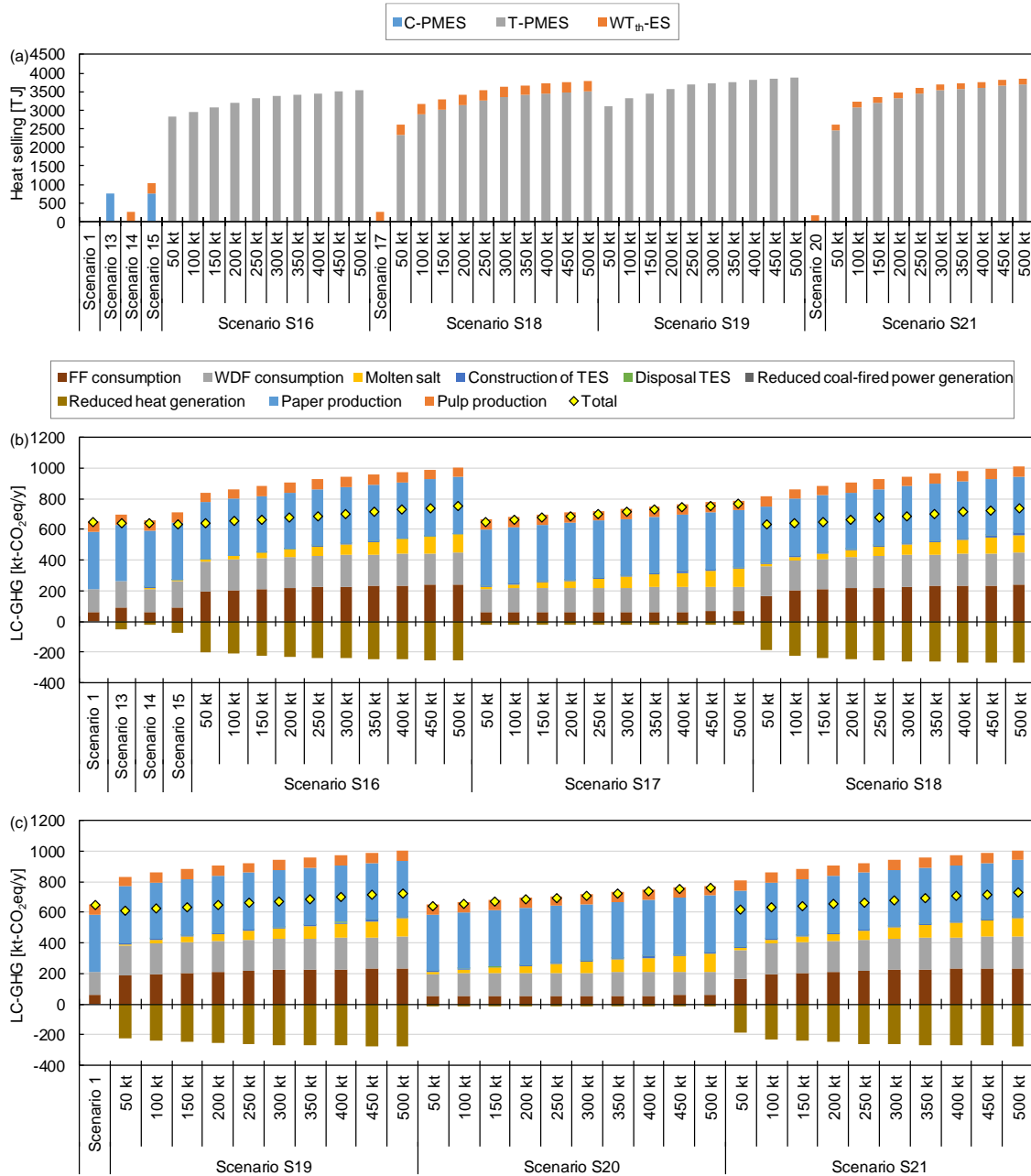


Figure 3-18. Results of scenarios 1 and 13–21 with 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>. (a) Heat selling. (b) LC-GHG of scenarios 13–18. (c) LC-GHG of scenarios 19–21.

### 3.3.5. 売電と売熱の両方を行った場合

製紙工場が売電と売熱の両方をした場合を検討した。Figure 3-19 (a)に示すように売熱量を設定した場合の売電量と LC-GHG を算出した。売熱量を減らすと、売電量が増加し（Figure 3-19 (b)参照）、売電用のタービンの主蒸気の必要量が増加するため、燃焼炉の負荷が上がり燃料消費量が増加したが、売電による GHG 削減量の方が大きいため、LC-GHG は減少した（Figure 3-19 (c)参照）。得られた結果からは製紙工場から売電だけした方が LC-GHG を削減できると考えられるが、売電した電力が代替するのを石炭火力発電ではなく LNGCC に代えたり、動力設備の性能を変更したりすることで、LC-GHG が変化することが予想される。したがって、代替する発電の種類や製紙工場の状態、例えば発電効率や地域性などのパラメータを考慮して、TES の導入量や売電・売熱の比率を適切に設定する必要がある。

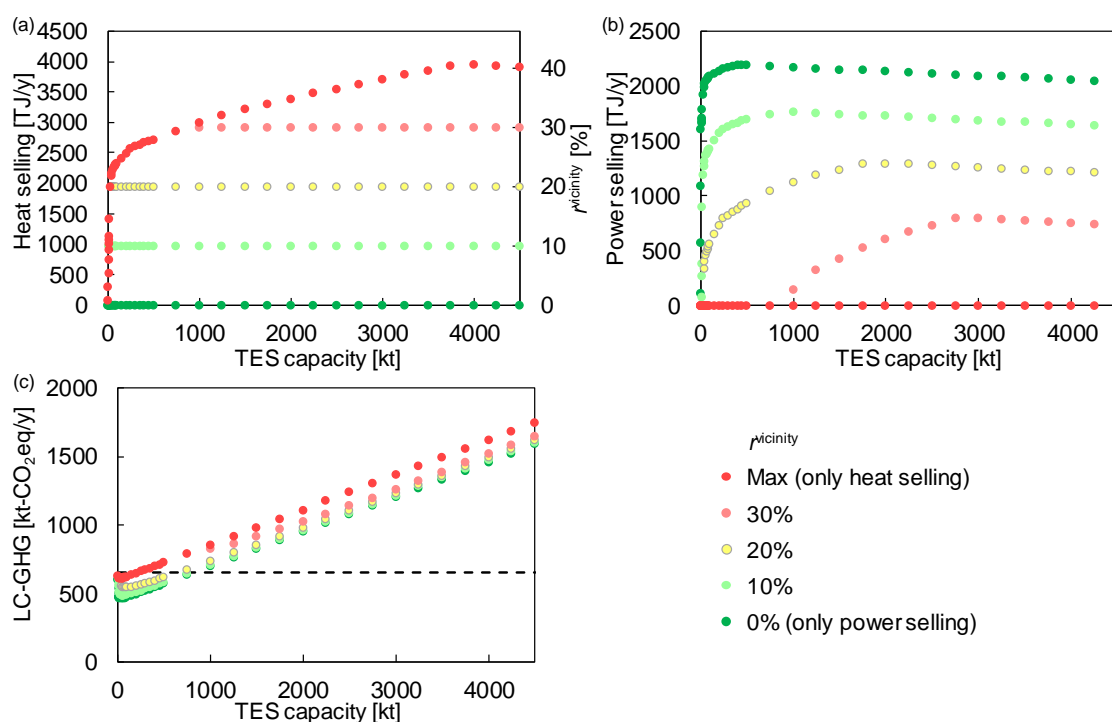


Figure 3-19. Both power and heat were sold from the paper mill with 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>. Only power selling (0%- $r_{vicinity}$ ) and heat selling (Max- $r_{vicinity}$ ) are the same as the results shown in Figure 3-13 and Figure 3-14. Adapted from [ii]. (a) Heat selling given to sell both power and heat. (b) Power selling which could be sold when heat selling shown in (a) was sold. (c) LC-GHG. The dotted line represents LC-GHG from C-PMES.



### 3.3.6. 地域の太陽光を利用するための出力調整

製紙工場の周辺地域に太陽光発電が導入された場合に、太陽光発電の出力分、売電量を削減することを検討した。Figure 3-20 に売電量を太陽光発電に合わせて制御した場合の売電量と LC-GHG を示す。比較として、売電量が一定としたときの  $WEC_{th}$  が 0 MW<sub>e</sub> と 100.8 MW<sub>e</sub> の時の結果も示した。売電量は TES を 1000 kt 導入した時で 2060 TJ/y、LC-GHG が最小になったのは TES が 40 kt の時で 504 kt-CO<sub>2</sub>eq/y あった。売電量を一定とした時は、最大で TES を 450 kt 導入時に 2199 TJ/y の売電量があったが、太陽光発電と組み合わせた時の T-PMES からの売電量は減少した。この原因を調べるため、高温タンクに溜められた溶融塩量の変化を Figure 3-21 に示す。太陽光発電と組み合わせた場合、11/23 に高温タンク内の溶融塩量は最小となっているため、11/23 に売電可能な量以上に売電することはできない。しかし、5～10 月は太陽光発電による発電量が多く、蓄熱量が多いことからわかるように、T-PMES の売電能力はあるのに売電ができていない。売電量を一定とした時は、5～10 月の間に度々蓄熱量が減少しており、売電能力には余裕はないが、常に一定量の売電をすることで、年間の売電量は多くなった。

太陽光発電と組み合わせた場合は、太陽光発電による電力によって地域で使える電力が増加し、地域の LC-GHG は減少するはずである。Figure 3-20 に太陽光発電による出力分削減した電力も含めた結果を示す。太陽光発電による発電を組み合わせることで、地域で利用可能な電力が大幅に増加し、LC-GHG の削減も可能であることがわかった。

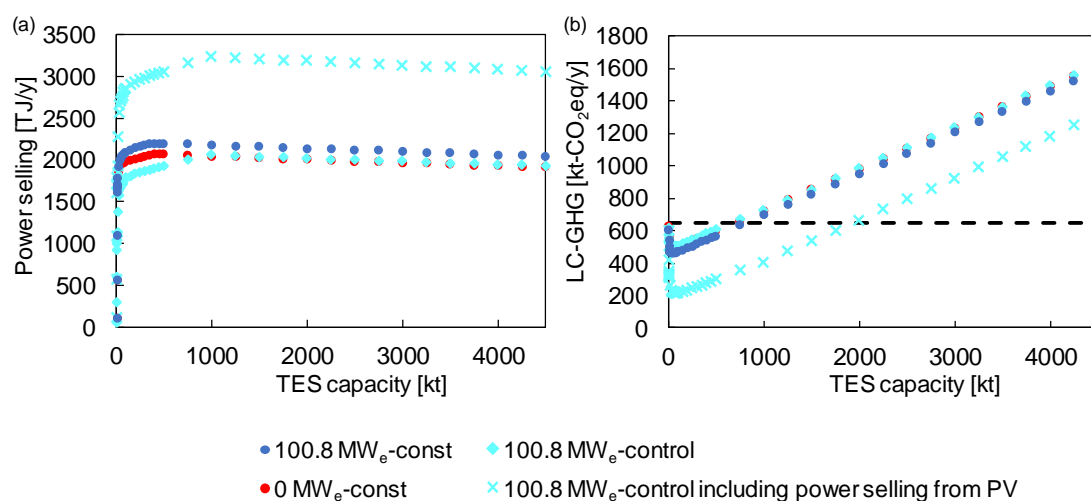


Figure 3-20. The amount of power selling was controlled to prioritize power derived from PV. (a) The amount of power selling. (b) LC-GHG. The dotted line represents LC-GHG from C-PMES.

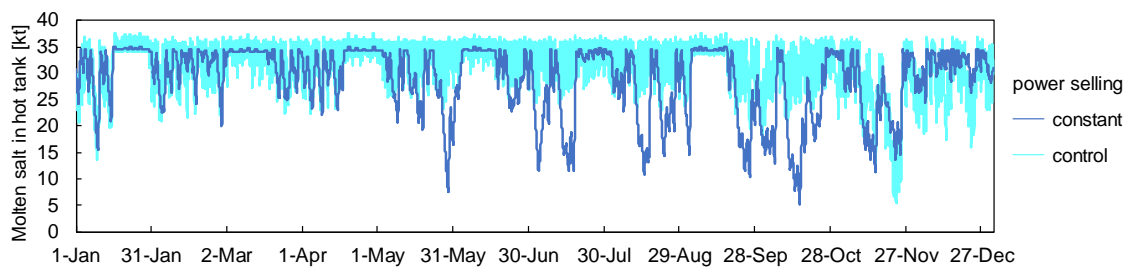


Figure 3-21. Molten salt in the hot tank installed in the paper mill with 40 kt-TES and 100.8 MW<sub>e</sub>-WEC<sub>th</sub>.

### 3.4.まとめ：製紙工場で期待される風力の利用

本章では、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証をするために、蓄熱技術を導入した製紙工場のモデルを構築し、エネルギー収支のシミュレーションによる評価を行った。風力と TES を導入した製紙工場で期待されることとして以下のことが考えられる。

- TES の導入量により、売電・売熱量や LC-GHG は変化する（3.3.2 項参照）。売電・売熱量は TES の導入量に対して最大値を持ち、過剰に導入すると売電・売熱量は減少する。LC-GHG は TES の導入量に対して最小値を持ち、過剰に導入すると製紙工場を含めた周辺地域全体の LC-GHG は増加する。TES の導入量によってエネルギー供給力が変わるため、地域のエネルギー需要に合わせて TES の導入量を設計することで、地域に必要な分のエネルギー供給が行えると考えられる。TES の導入量が同じ場合、風力を導入することで、売電・売熱量は増加し、LC-GHG は削減できた。
- 風力は製紙工場だけで利用するより、地域に売電や売熱をした方が LC-GHG は削減可能である（3.3.4 項参照）。風力を製紙工場だけに導入した場合、削減できるのは製紙工場で使用される化石燃料の消費量だけだが、地域に売電・売熱することで、石炭火力発電や熱需要のための化石燃料や電力を削減できるからである。工場と風力、地域を組み合わせることで、地域全体の LC-GHG を削減が可能となる。
- 地域全体での TES や風力の総導入量が同じ場合、地域だけで風力を利用するために TES を導入するより、製紙工場に導入した TES に風力を接続して一緒に利用することで、売電・売熱量は増加し、LC-GHG の削減量も大きくなる（3.3.4 項参照）。

風力の変動が大きく、蓄熱してもタンク壁からの放熱により蓄熱量が減少してしまい、売電・売熱量を確保できないためである。TESを導入した工場と風力を組み合わせることで、効率的なエネルギーの利用が可能となる。

- TESからの電力や熱の出力を制御することで、地域に売電と売熱の両方を行うことが可能となる（3.3.5項参照）。風力由来のエネルギーを、需要に応じて電力や熱として供給可能である。
- 地域に太陽光発電が導入された場合、TESを経由した電力は出力を太陽光発電に合わせて制御することが可能である（3.3.6項参照）。太陽光発電は昼しか発電できないが、夜はTESを経由した電力を使用することで、地域で利用可能な再エネ由来の電力は大幅に増加し、LC-GHGを削減できる。

以上のことから、製紙工場に風力とTESの両方を導入することで、地域に売電や売熱を効率的にできるようになり、地域全体のLC-GHGも削減可能になる。TESの導入量を地域のエネルギー需要に合わせて設計することで、地域に必要な分のエネルギー供給が行えるようになる。また、直接TESに接続しなくても、TESを経由したエネルギーの出力を調整することで、地域全体の変動性再エネの導入量を増加させることが可能となる。

## 第4章 日本各製紙工場における蓄熱技術 と再エネを導入した熱電供給システム

---

### 4.1.概要：工場や地域の特性を考慮した熱電供給システム

第3章では、蓄熱技術を導入した製紙工場が、再エネを利用して工場と地域にエネルギー供給をするエネルギー拠点として機能することを示した。しかし、特定の製紙工場に蓄熱技術や再エネの導入効果が得られても、生産規模や気候の異なる地域にある製紙工場でも同様の効果が得られるとは限らない。Figure 4-1 に、本章で対象とするライフサイクルバウンダリの中で、製紙工場や地域の特性によって変化するパラメータを示す。製紙工場の違いによるパラメータは、生産量や、ボイラ・タービンの設備能力、使用する燃料種が挙げられる。地域の特性としては、風速や気温、気温や市町村の規模によって決める熱需要（3.2.2 項参照）が挙げられる。

本章では、第3章で構築したモデルを日本各地に存在する製紙工場に適用し、各工場における蓄熱技術や再エネの導入効果を評価することで、工場や地域の特性による違いの比較を行った。また、地域の間伐材を化石燃料の代わりに用いることでGHGを削減することを検討した。各工場のシミュレーション結果を比較し、TESの導入量とエネルギー供給力の関係を分析した。以上の分析を基に、日本各地の製紙工場における蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証をした。

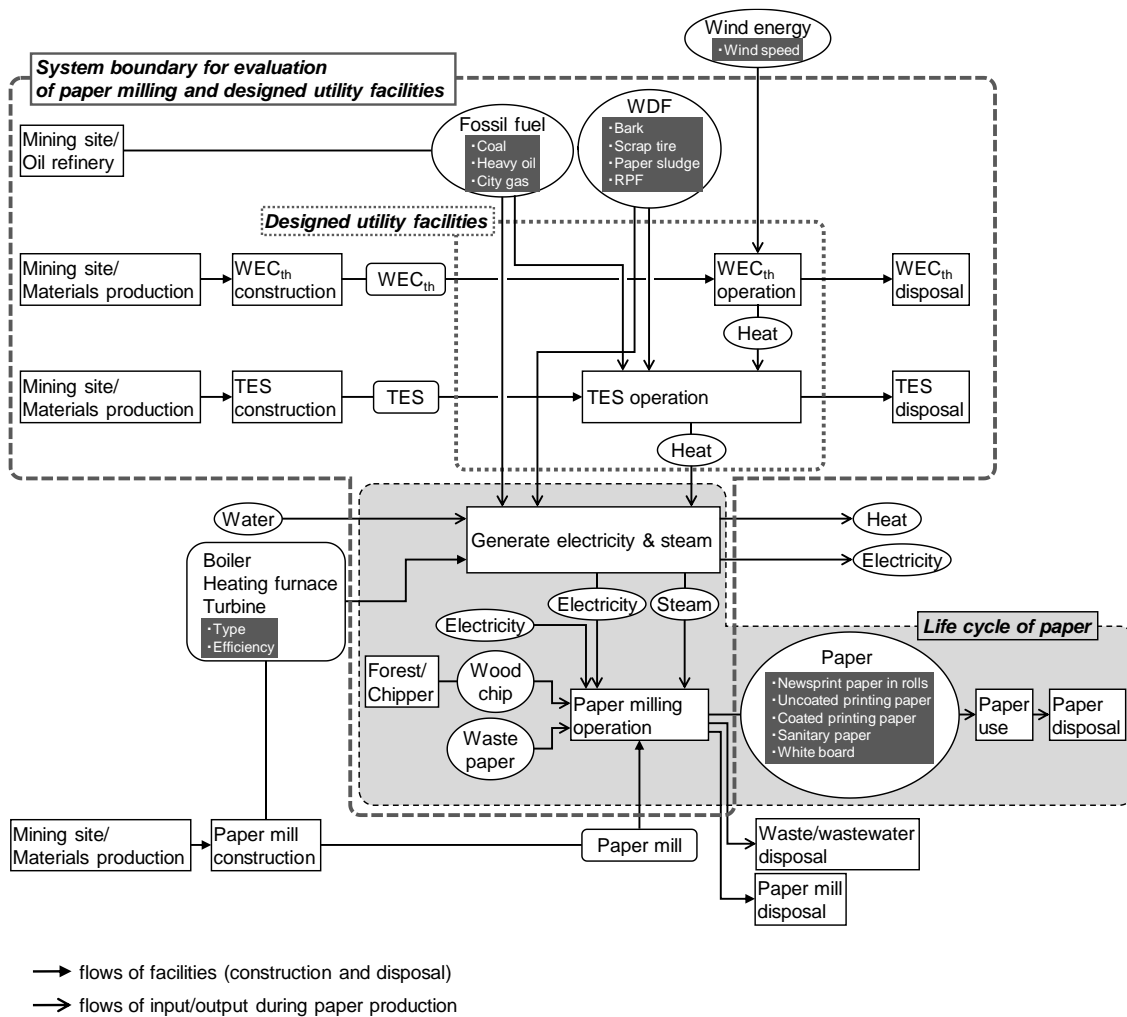


Figure 4-1. Life cycles of paper products and utility facilities. The rounded-corner objects represent facilities utilized for a long time, i.e. a paper mill, TES, WEC<sub>th</sub>, and utility facilities. The site-specific parameters of the paper mill and the region are presented with bullet points in these objects. Adapted from [ii].

## 4.2. 工場や地域の特性を考慮するための条件設定

### 4.2.1. 対象とした製紙工場の特性

対象となる製紙工場を Figure 4-2 に示し、その設定データを Table 4-1 に示す。製紙工場の条件として、生産量、気象条件、自家発電用の動力設備の性能などを文献から抽出し、燃料の種類は Table 4-1 の文献に基づいて設定した。対象とした製紙工場は 39 か

所で、45 MW 以上のボイラを持つ日本の製紙工場の 67%に当たる。ガスタービンを保有している製紙工場や、生産量などのデータが文献から得られない製紙工場は対象外とした。生産する紙の種類は、Table 4-1 に示した文献を参考にして、製紙工場ごとに設定した。操業スケジュールは、第 3 章で構築したモデルと同様に、メンテナンスのためのライン休止を長期と短期で設定した。1 時間単位で 1 年間仮定した各製紙工場の操業スケジュールを Figure S 1 に示す。各製紙工場で使用する燃料の種類や、ボイラとタービンの能力、種類、数は[99]を参照した (Table 4-1 も参照)。ボイラ／燃焼炉の使用方法は 3.2 節と同じとした。

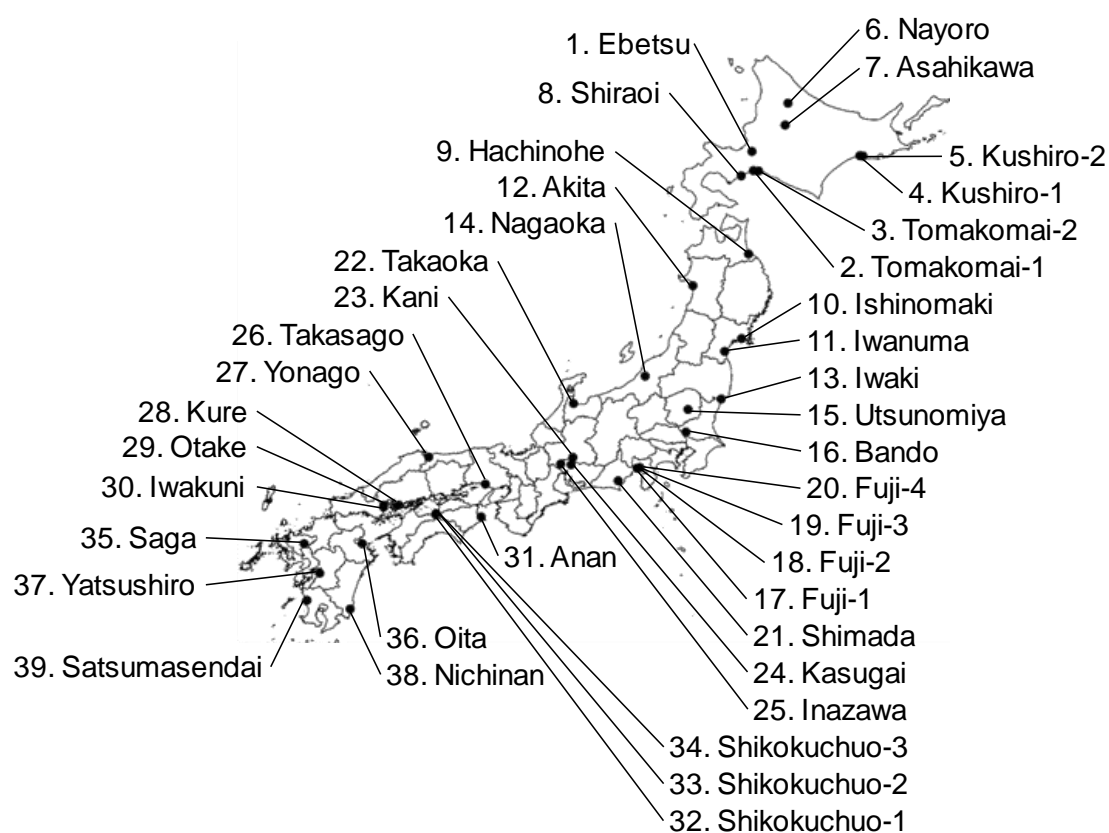


Figure 4-2. Target paper mills. Adapted from [ii].

Table 4-1. Target paper mills with their product amount, meteorological conditions and capacities of in-house utilities. Adapted from [ii].

No.	Paper mill	Paper mill conditions			Regional conditions			Reference
		Paper product	Turbine capacities [99]	Boiler capacities [99]	Wind installation potential [123]	Ambient temperature (max/min) [116]	Available woody biomass [124]	
		t/d	MW	MW	MW <sub>e</sub>	°C	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	
1	Ebetsu	647	37.5	292.9	111.3	30.6/–24.4	142	[125]
2	Tomako mai-1	3,623	268.2	1150.3	331.8	30.7/–17.8	794	[126]
3	Tomako mai-2	1,121	58.5	333.3	331.8	30.7/–17.8	246	[127]
4	Kushiro-1	1,207	79.3	314.7	2685.9	29/–16.5	265	[128]
5	Kushiro-2	1,264	132.5	535.8	2685.9	29/–16.5	277	[129]
6	Nayoro	710	12.7	73.6	315	34.3/–24.2	156	[130]
7	Asahika wa	793	51.9	338.6	2100	33.9/–19.8	174	[131]
8	Shiraoi	1,709	83.0	498.9	252	32/–17.6	375	[132]
9	Hachino he	2,480	143.8	680.8	289.8	33.8/–9.4	322	[133]
10	Ishinoma ki	4,150	206.3	1053.6	327.6	35.2/–7.8	340	[134]
11	Iwanuma	2,210	179.7	855.7	35.7	34.6/–8.8	181	[135]
12	Akita	2,100	77.1	531.9	879.9	37.3/–9.5	2,077	[136]
13	Iwaki	252	16.0	96.7	1278.9	33.9/–5.2	1,035	[137]
14	Nagaoka	116	12.1	78.1	268.8	38.7/–6.3	601	[138]
15	Utsunomiya	645	11.6	130.5	35.7	36.5/–7.9	407	[139]
16	Bando	1,070	17.9	122.2	14.7	36.5/–7.1	148	[140]

Table 4-1 Target paper mills with their product amount, meteorological conditions and capacities of in-house utilities. Adapted from [ii]. (continued)

17	Fuji-1	1,359	100.9	407.4	65.1	34.3/−4.8	166	[141]
18	Fuji-2	147	6.9	46.3	65.1	34.3/−4.8	18	[142]
19	Fuji-3	1,730	70.0	556.7	65.1	34.3/−4.8	211	[143]
20	Fuji-4	1,790	34.0	227.6	65.1	34.3/−4.8	218	[144]
21	Shimada	2,015	49.5	284.3	84	34.7/−3.8	246	[145]
22	Takaoka	1,853	70.7	395.3	16.8	36.7/−5.1	198	[146]
23	Kani	935	74.7	404.7	18.9	39.4/−7.6	1,209	[147]
24	Kasugai	2,293	125.7	651.8	27.3	40.2/−3.6	214	[105]
25	Inazawa	1,084	23.3	114.7	23.1	38.5/−4.3	101	[148]
26	Takasago	512	13.5	112.6	10.5	34.8/−2.5	800	[149]
27	Yonago	1,300	119.4	707.6	33.6	37.2/−5.4	394	[150]
28	Kure	663	64.0	337.6	96.6	34.8/−3.4	152	[151]
29	Otake	1,124	43.9	343.7	21	36.2/−4.3	257	[152]
30	Iwakuni	1,740	105.0	567.7	369.6	36.5/−5.2	1,161	[153]
31	Anan	2,104	108.0	551.0	52.5	36.8/−2.6	866	[122]
32	Shikokuc huo-1	7,014	523.9	3219.3	113.4	37.1/−3.6	573	[154]
33	Shikokuc huo-2	1,630	175.9	757.0	113.4	37.1/−3.6	133	[155]
34	Shikokuc huo-3	620	40.0	209.5	113.4	37.1/−3.6	51	[156]
35	Saga	1,143	25.2	147.4	84	38.2/−3.3	182	[157]
36	Oita	1,160	42.8	264.9	119.7	36.7/−3.2	1,795	[158]
37	Yatsushir o	1,500	151.8	633.7	258.3	37.1/−3.4	1,453	[159]
38	Nichinan	776	51.3	302.2	107.1	33.7/−2.4	1,564	[160]
39	Satsumas endai	753	45.9	254.9	478.8	35.5/−4.1	1,150	[161]



#### 4.2.2. シミュレーション条件の設定

各製紙工場を対象とするライフサイクルシステムバウンダリは3.2節で定義したものと同一とし、機能単位は **Table 4-1** に示した製紙工場の生産量とした。LCA に用いたデータは3.2節と同様に、エネルギー収支のシミュレーションと LCI データベース[120, 121]から抽出した。売電は、化石燃料を用いる日本の電力供給の中間電源で、GHG 排出原単位が最も多い石炭火力発電または GHG 排出原単位が最も少ない LNG コンバインドサイクル (LNGCC) を代替するとした。化石燃料の代替として地域の木質バイオマスを用いることを検討した。木質バイオマスは、健全な森林を維持するために複層林移行・天然林移行・間伐として伐採されるべきであり、その伐採量の推移は2012年から150年間、推算をされている[124]。現在の日本では伐採不足により森林の齢級分布が高樹齢領域に偏っており、数年は高齢化した木を大量に伐採する必要があるため、伐採量は多くなるが、2050年頃になると伐採量が落ち着いたため、本研究では、製紙工場のある都道府県内で、2052年に伐採されるべき木質バイオマスを燃料として用いると仮定した。県内に複数の製紙工場がある場合は、製紙工場の生産量に応じて木質バイオマスの量を配分した。各製紙工場で利用可能な木質バイオマス量を **Table 4-1** に示す。売熱は、第3章と同様に、熱供給のために使用される重油、都市ガス、電力を代替するとし、冷暖房機器の COP は機器の種類に関わらず 0.7 とした[12]。売熱用の配管のサイズも第3章と同様に、熱量 (ジュール) ベースのシミュレーションのため考慮せず、配管設置による環境負荷も LCA から除外した。燃料の使用量は 3.2.4 節で述べた設定と同様にした。

地域や製紙工場の条件に影響されるパラメータは、風速、風力導入ポテンシャル、気温、地域の熱需要、生産量、製紙工場の動力設備の仕様である。 $WEC_{th}$  の数は、表2の風力導入ポテンシャルと  $WEC_{th}$  の定格出力 (2.1 MW<sub>e</sub>) から設定した。例えば、対象地域の風力導入ポテンシャルが 30 MW の場合、 $WEC_{th}$  の数は 14 基とした。製紙工場がその地域の熱需要を賄える場合、つまり  $r_{vicinity}$  が 100% となる場合、製紙工場は  $r_{vicinity}$  が 100% よりも多くの熱は供給しないとした。

**Table 4-1** に示した製紙工場に TES や  $WEC_{th}$ 、木質バイオマスを導入した時の結果を比較した。TES の導入量によって結果が変わるため、各製紙工場間で売電量と売熱量を比較する時には、各製紙工場の TES の導入量を変えた時に最大となる売電量または売熱量を各製紙工場の代表値とした。また、各製紙工場の LC-GHG の代表値は、TES の導入量を変えた時に最小となる LC-GHG とした。

製紙工場からの電力で代替される従来型電源と、製紙工場の燃料の変化について、複数の仮定を設定して比較を行った。売電によって代替する従来型電源は石炭火力発電と LNGCC とし、製紙工場で使用される化石燃料を代替する燃料として木質バイオマスを検討した。そこで、石炭火力発電と LNGCC を代替する場合のそれぞれで木質バイオマスを導入した場合としない場合の 4 つのケースを設定した。

### 4.3. 日本の各製紙工場における蓄熱技術と再エネの導入評価

#### 4.3.1. 各製紙工場に蓄熱技術と風力を導入した場合

39 か所の製紙工場の売電・売熱量を Figure 4-3 に、その売電・売熱量を供給するのに必要となる TES の容量を Figure 4-4 に示す。大規模な製紙工場には高出力のボイラがあるため、売電・売熱量は多くなった (Figure 4-3)。紙の生産量が多い工場、例えば、7,014 t/d の製紙工場では、売電量が多い割に売熱量が少ない。これは、製紙工場の周辺地域の熱需要が満たされた条件、つまり  $r^{\text{vicinity}}$  が 100% の場合は、 $r^{\text{vicinity}}$  が 100% 以上になる場合を計算していないためである。このような製紙工場では売熱量を増やすための余力があり、地域にとっては未利用資源となる可能性がある。大規模な製紙工場では、紙の生産と売電・売熱のために多量の電力と熱を供給するために、より大きな TES の容量が必要となる (Figure 4-4)。紙の生産量が約 1,200 t/d で WEC<sub>in</sub> 導入時に TES の導入量が多かった 2 工場は Kushiro-1 と Kushiro-2 (No. 4 と 5) で、Kushiro は風力の導入ポテンシャルの高い地域であるため、大きな TES が必要となった。

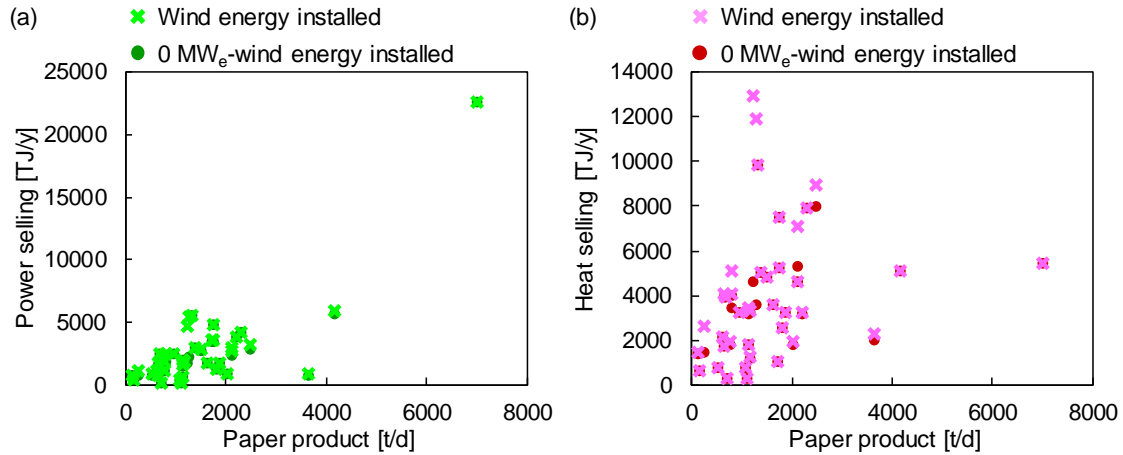


Figure 4-3. Relation of 39 paper mills (Nos. 1–39) between paper product and power or heat selling. The amount of wind energy installation is given in Table 4-1. Adapted from [ii]. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

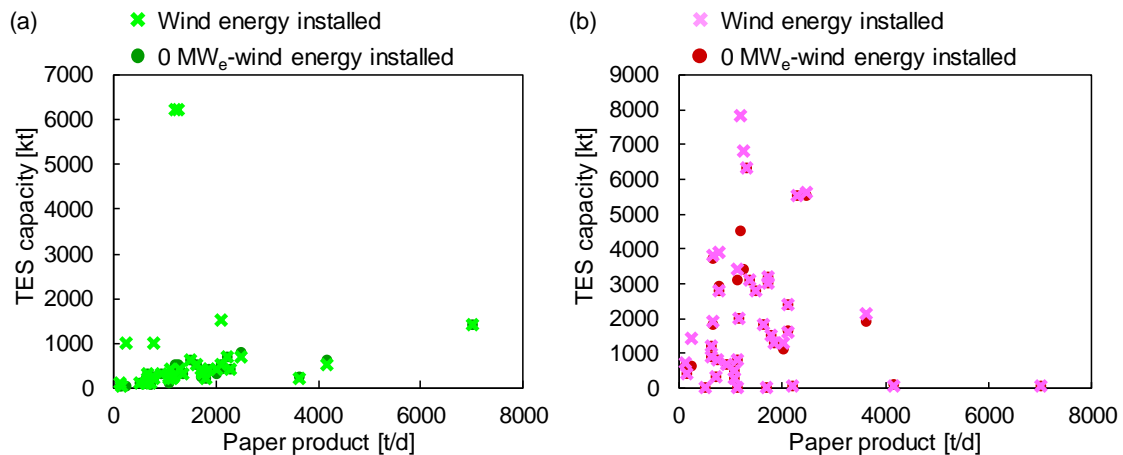


Figure 4-4. Relation of 39 paper mills (Nos. 1–39) between paper product and TES capacity. The amount of wind energy installation is given in Table 4-1. Adapted from [ii]. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

各製紙工場からの LC-GHG を Figure 4-5 に、紙の生産量あたりの LC-GHG を Figure 4-6 に示す。1,000 t/d 未満の一部の製紙工場では、TES や  $WEC_{th}$  を導入することで LC-GHG が 0 以下となり (Figure 4-5)、紙の生産量あたりの LC-GHG は、C-PMES と比較して大きく低下した (Figure 4-6)。  $WEC_{th}$  を導入することで、ほとんどの製紙工場が LC-GHG を削減できたが、風速が遅いために  $WEC_{th}$  の導入量に対して十分な売電や売熱をできず、LC-GHG が増加した製紙工場もあった。 Figure 4-7 に、

TES のみを導入した状態から  $WEC_{th}$  を導入すること変化した LC-GHG の量を示す。LC-GHG が増加した製紙工場は、 $WEC_{th}$  1 基当たりの発熱量が小さく、風速の弱い地域に位置していることがわかる。本研究では、すべての製紙工場に同じ性能の  $WEC_{th}$  (2.1 MW<sub>e</sub>) を導入したため、LC-GHG が増加したが、風速に応じて小型の  $WEC_{th}$  を設置することで LC-GHG を削減できる可能性がある。単位  $WEC_{th}$  当たりの発熱量が同じであっても、LC-GHG 削減量に差があるのは、 $WEC_{th}$  の導入によって削減された燃料の種類が異なるためである。最も LC-GHG 削減率が高かったのは、Nagaoka (No. 14) の  $WEC_{th}$  を導入せず 4 kt-TES を導入し売電した場合で、C-PMES と比較して 155%削減でき、売電により石炭火力発電の GHG 排出量を大幅に削減できることがわかった。

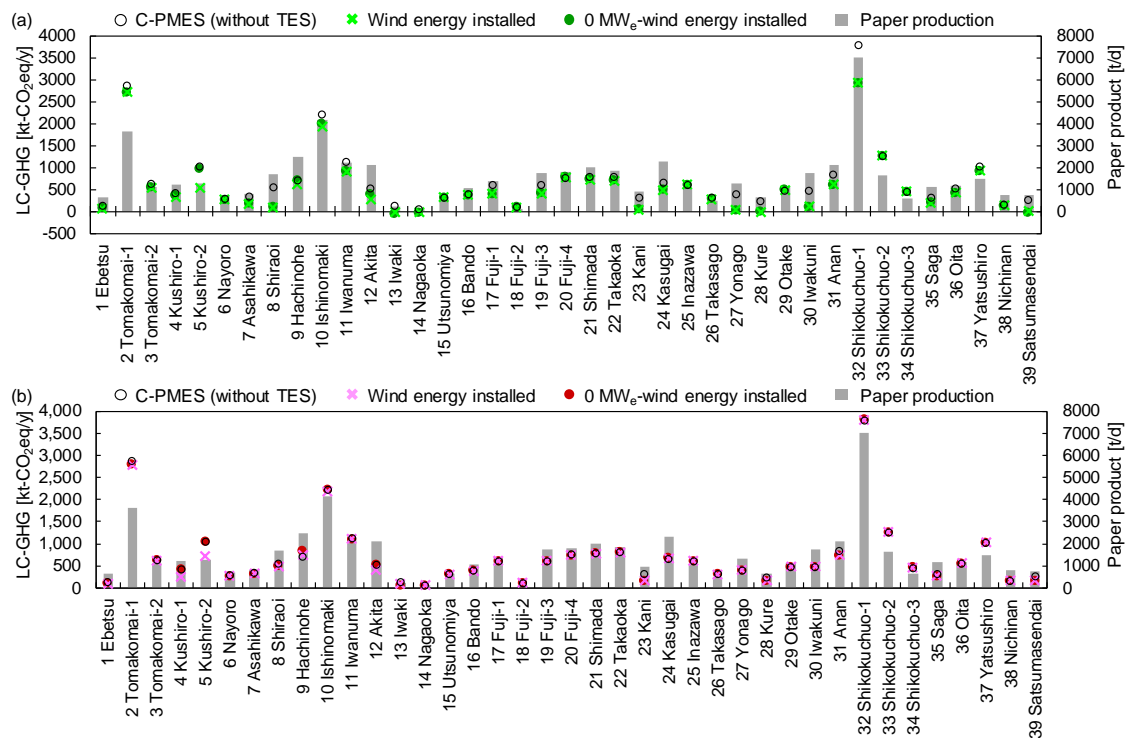


Figure 4-5. LC-GHG for 39 paper mills (Nos. 1–39). Adapted from [iii]. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

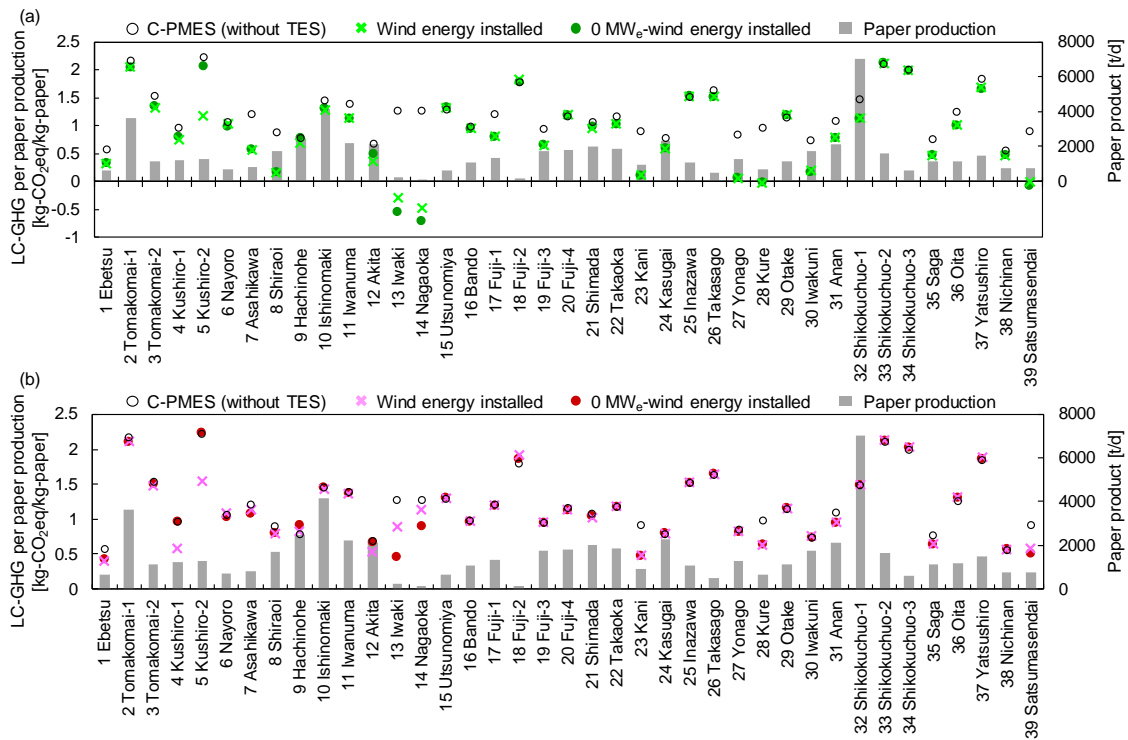


Figure 4-6. LC-GHG per paper product for 39 paper mills (Nos. 1–39). Adapted from [iii]. (a) When power was sold. (b) When heat was sold.

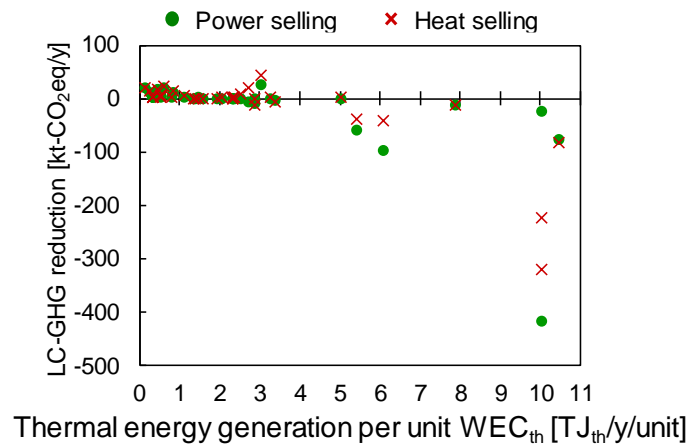


Figure 4-7. The amount of LC-GHG reduced by  $\text{WEC}_{\text{th}}$  installation for the condition of only TES installed. Adapted from [iii].

#### 4.3.2. 代替電源の変更と木質バイオマスの導入による効果

売電時に石炭火力発電以外の電源の代替として LNGCC を代替する場合を検討した。また、製紙工場で用いられる化石燃料の代わりに木質バイオマスを利用することを検討した。Figure 4-8 は、様々な状況における燃料原単位と LC-GHG 削減率について C-PMES と比較したものである。売電した電力で LNGCC による発電を代替した場合、LNGCC の GHG 排出原単位が石炭火力発電より低いため、売電による GHG 削減量が減少し、LC-GHG は高くなった。TES と WEC<sub>h</sub> を導入した場合に、C-PMES より LC-GHG が高くなった製紙工場は、石炭火力発電代替時には 6 工場であったが、LNGCC 代替時は 16 工場となった。木質バイオマスを利用することで、石炭火力発電代替時には全製紙工場で LC-GHG を削減できたが、LNGCC 代替時には LC-GHG が増加したのは 2 工場であった。このうち 1 工場では、地域の木質バイオマスの量が少なく、化石燃料の使用量を十分に削減できなかったため、もう 1 工場では、主に廃棄物燃料を使用しており、削減対象とした化石燃料の使用量が少なかったためである。売熱をした場合は、木質バイオマス未導入時には 16 工場で LC-GHG が増加したが、木質バイオマスの導入によりすべての製紙工場で C-PMES より LC-GHG を削減できた。LC-GHG 削減率が最も高かったのは、売電時に石炭火力発電を代替し、木質バイオマスを導入した Nagaoka (No. 14) で C-PMES より 365%削減できた。Nagaoka (No. 14) では使用している燃料の 100%が天然ガスだが、製紙工場が小規模 (116 t/d) であるため、全ての燃料を木質バイオマスに代替できた。

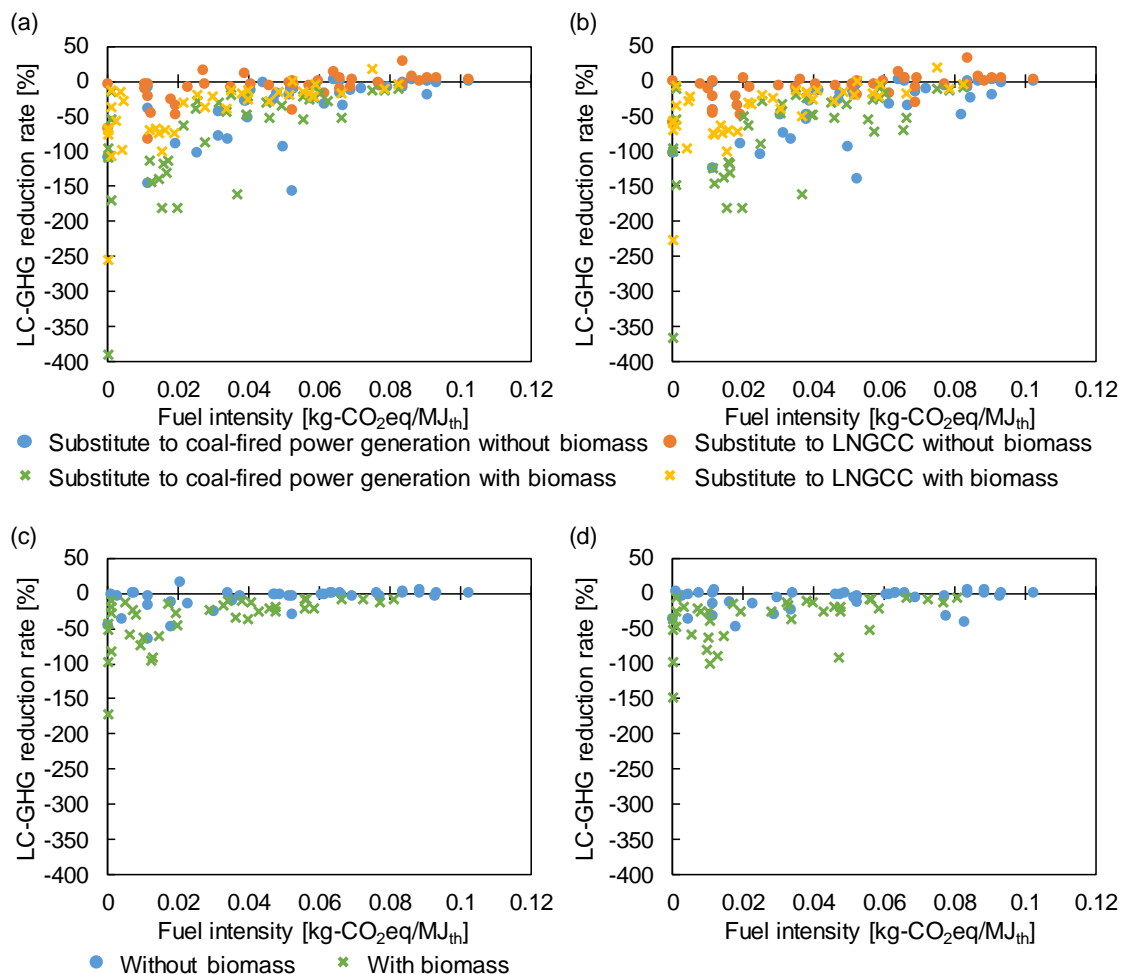


Figure 4-8. Comparison of 39 paper mills between fuel intensity and LC-GHG reduction rate to C-PMES for various situations. (a) When power was sold without  $WEC_{th}$ . (b) When power was sold with  $WEC_{th}$ . (c) When heat was sold without  $WEC_{th}$ . (d) When heat was sold with  $WEC_{th}$ . Adapted from [ii].

#### 4.3.3. 製紙工場の特徴による再エネの導入効果の違い

全国の製紙工場のケーススタディの結果を分析し、傾向を調査した。製紙工場に TES のみを導入し、売電・売熱を行う場合、売電・売熱量は製紙工場のボイラ／燃焼炉の余力によって決まると考えられる。製紙工場にあるボイラ／燃焼炉の能力と、TES 未導入の現状の製紙工場でのボイラ／燃焼炉の出力量の差を、燃焼炉の余力と定義し、燃焼炉の余力と売電・売熱量の関係を調べた (Figure 4-9)。TES 導入時には、売電量は一定、売熱量は地域の熱需要に応じて変化させるとしたが、燃焼炉の余力を売電量や売熱量の

大きさに関係なくすべて売電、売熱を行う場合（燃烧炉の全余力で売電したときの売電  
量、燃烧炉の全余力で売熱したときの売熱量）と比較した。TES 導入時の最大売電可能  
量と最大売熱可能量はともに、燃烧炉の余力とほぼ比例して増加した。TES 導入時に売  
電した場合、ほとんどの工場で燃烧炉の全余力で売電を行ったとき以上に売電できたが、  
これは、TES 導入時には抽気タービンで発電したときに発生した蒸気を回収し再蓄熱し  
ているため、利用可能なエネルギーが増えているためである。一方、売熱時には、燃焼  
炉の全余力で売熱を行った場合より、蓄熱時の売熱量が少なくなった。TES の導入量が  
増加するにつれ、燃烧炉の全余力で売熱したときの売熱量と TES 導入時の売熱可能  
量の差は直線的に増加したことから、TES の導入量が増加することで放熱による熱ロスが  
大きくなり、TES 導入時の売熱量が減少したと考えられる。

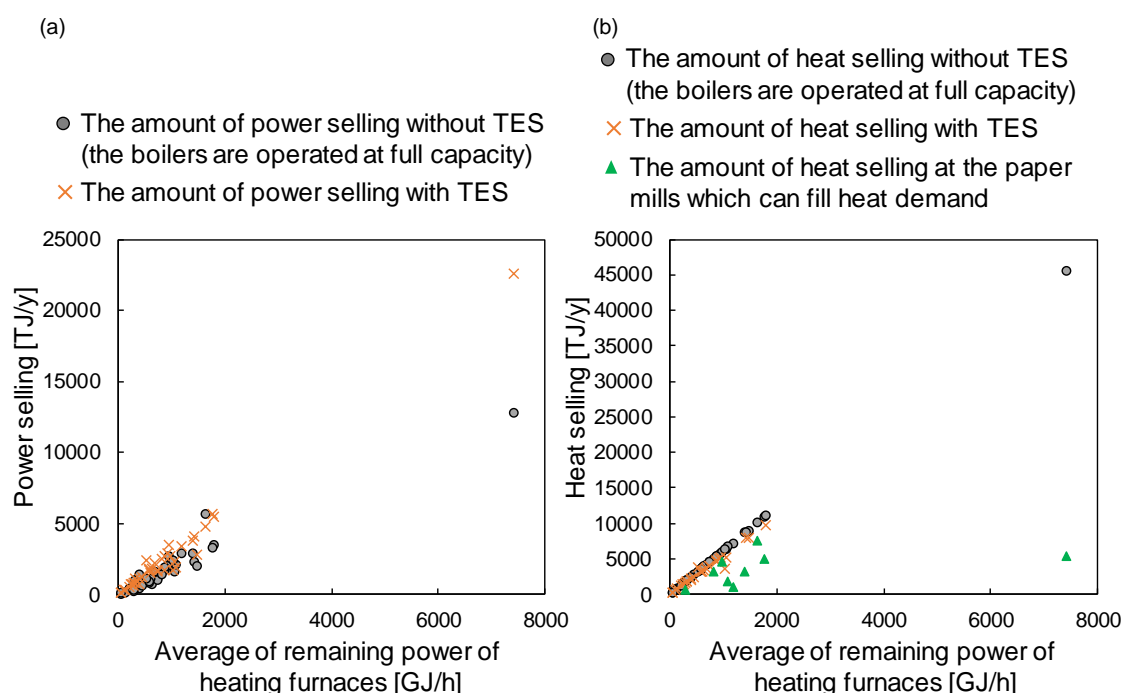


Figure 4-9. Relation between power or heat selling and remaining power of heating furnaces when to install only TES. (a) Power selling. (b) Heat selling.

以上の分析より、売電・売熱量は燃烧炉の余力と強い相関があることがわかった。次に LC-GHG の削減しやすさについて調査した。TES を導入して売電・売熱をする場合、TES の建設・廃棄と燃料消費による GHG 増加分と、売電・売熱による GHG 削減分の大きさによって、LC-GHG の増減が決まる。第 4 章の検討では、TES の導入は前提条件であるため、LC-GHG を削減するためには、燃料消費による GHG を増やさずに売電・売熱量を増やすことが求められる。そこで、売電・売熱量と LC-GHG 削減の関係を調べ



るため、売電・売熱量最大化時と LC-GHG 最小化時の売電・売熱量の関係を調べた (Figure 4-10)。LC-GHG 最小化時の売電・売熱量が、売電・売熱量最大時の値の 9 割以上を示した工場では、その工場の売電・売熱能力と相関のある燃烧炉の余力をほぼ使用していると考えられるため、Heating furnace-limited として表した。売電時には Heating furnace-limited に該当した工場は約半分であったが、売熱時にはなかった。

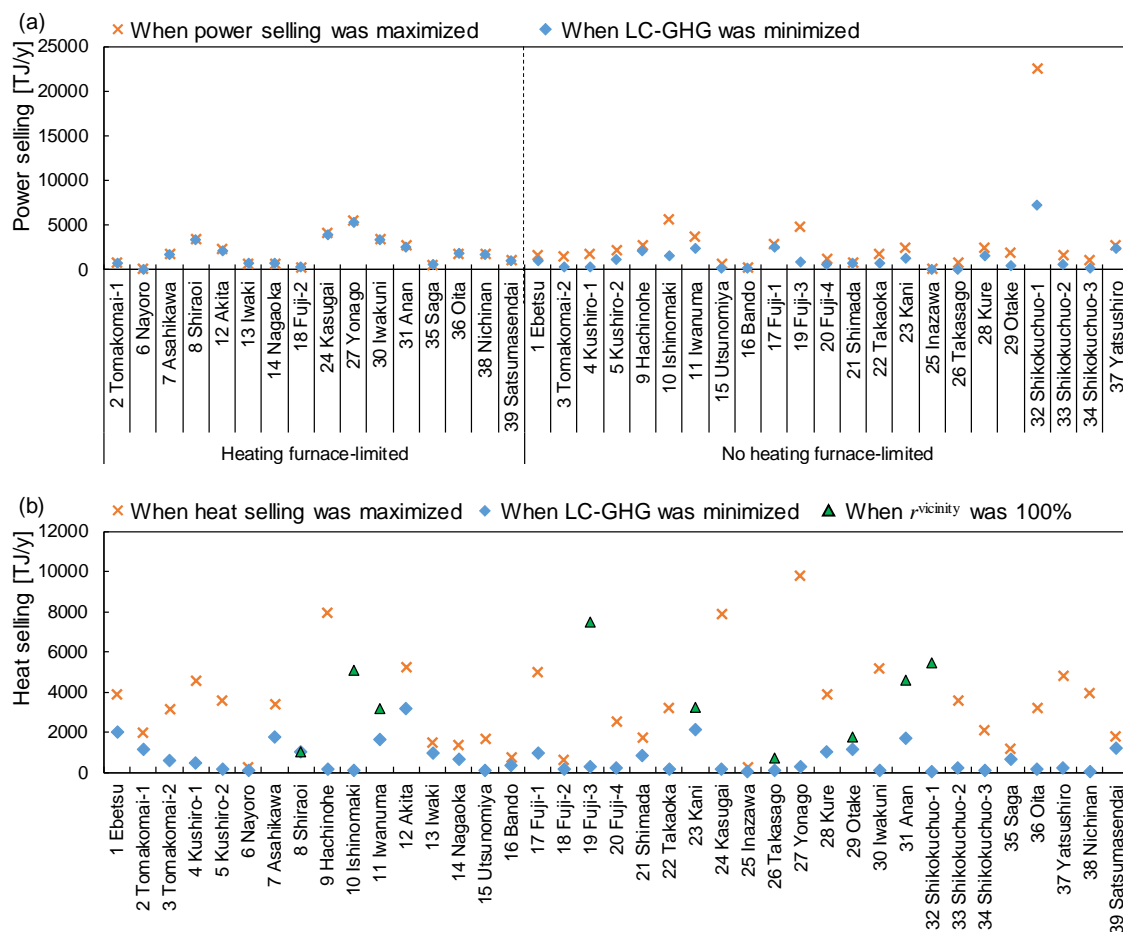


Figure 4-10. Comparison of LC-GHG between heating furnace-limited and no heating furnace-limited. (a) Power selling. (b) Heat selling.

燃烧炉の余力は、売電・売熱量と相関があり、また、燃烧炉で消費する燃料由来の GHG も排出するため、LC-GHG の削減に大きな影響を与えられる。LC-GHG の削減には、燃料消費による GHG を増やさずに売電・売熱量を増やすことが求められる。Table 4-2 に、燃烧炉の状態による、風力とバイオマスの導入効果の比較を示す。Figure 4-11 は風力導入時、Figure 4-12 は木質バイオマス導入時について、Table 4-2 に示した内容を示す 39 工場のシミュレーション結果である。

Table 4-2. Effect of installing renewable energy and TES when to minimize LC-GHG.

	Heating furnace-limited	No heating furnace –limited
Features	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Increasing TES capacity could not reduce LC-GHG because the annual heat input to TES is the same, so the amount of power or heat selling does not change.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Increasing TES capacity could increase the amount of power or heat selling and fuel consumption. LC-GHG could not be reduced because GHG emissions from fuel consumption is larger than GHG reduction from power or heat selling.</li> </ul>
Cause	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Small heating furnace</li> <li>● Small fuel intensity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Large fuel intensity</li> <li>● Large heating furnace for demand</li> </ul>
Wind installation	<p>&lt;Standard&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● The amount of power or heat selling increases. (Figure 4-11 (a))</li> <li>● It is difficult to reduce fuel consumption. (Figure 4-11 (b))</li> </ul> <p>&lt;Rare case&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● If wind installation capacity is small or if wind speed is slow, the amount of power or heat selling does not change. (Figure 4-11 (a))</li> </ul> <p>&lt;Improvement proposals&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Connect other VRE where the wind installation potential is small.</li> </ul>	<p>&lt;Standard&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● The amount of power or heat selling does not change. (Figure 4-11 (a)(c))</li> <li>● It is easy to reduce fuel consumption. (Figure 4-11(b)(d))</li> </ul> <p>&lt;Rare case&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● If wind installation capacity is large or if wind speed is fast, the amount of power or heat selling increases. (Figure 4-11 (a): Kushiro-1, 2 (No. 4,5))</li> </ul> <p>&lt;Improvement proposals&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Decrease the capacity of heating furnaces.</li> <li>● Leave a route to send steam directly from the boiler to the turbine.</li> </ul>
Biomass installation	<p>&lt;Standard&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● The amount of power or heat selling does not change. (Figure 4-12 (a))</li> </ul>	<p>&lt;Standard&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● The amount of power or heat selling increases. (Figure 4-12 (a)(c))</li> </ul>

- 
- It is easy to reduce fuel consumption. (Figure 4-12 (b))

- It is difficult to reduce fuel consumption. (Figure 4-12 (b)(d))

<Rare case>

- If fuel intensity decrease significantly (fuel consumption of the paper mill is large or regional biomass installation potential is large), the amount of power or heat selling increases.

<Rare case>

- If fuel intensity does not change (fuel consumption of the paper mill is small), the amount of power or heat selling does not change.
-

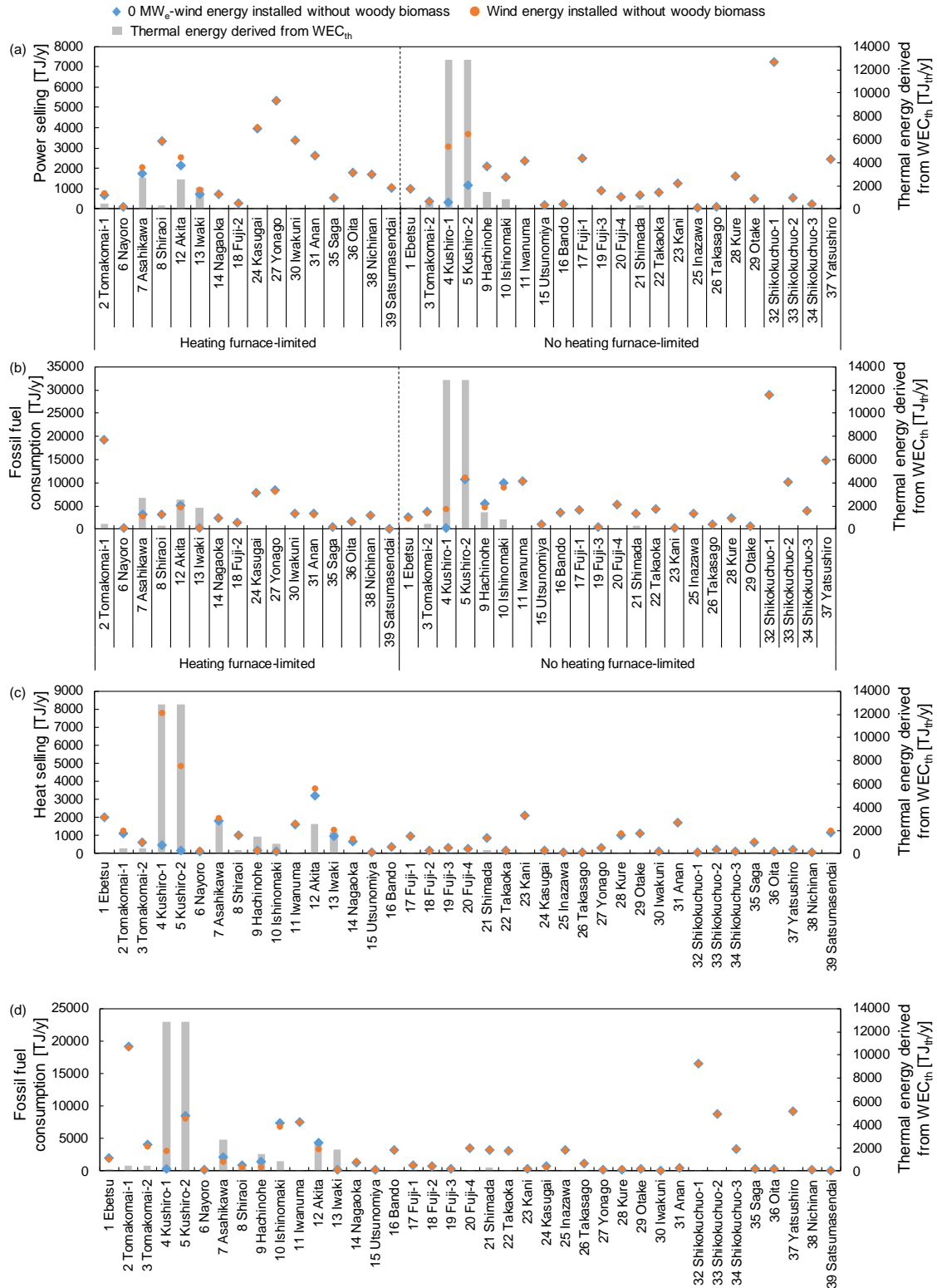


Figure 4-11. Comparison of LC-GHG with and without wind. (a) Power selling. (b) Fuel consumption when to sell power. (c) Heat selling. (d) Fuel consumption when to sell heat.

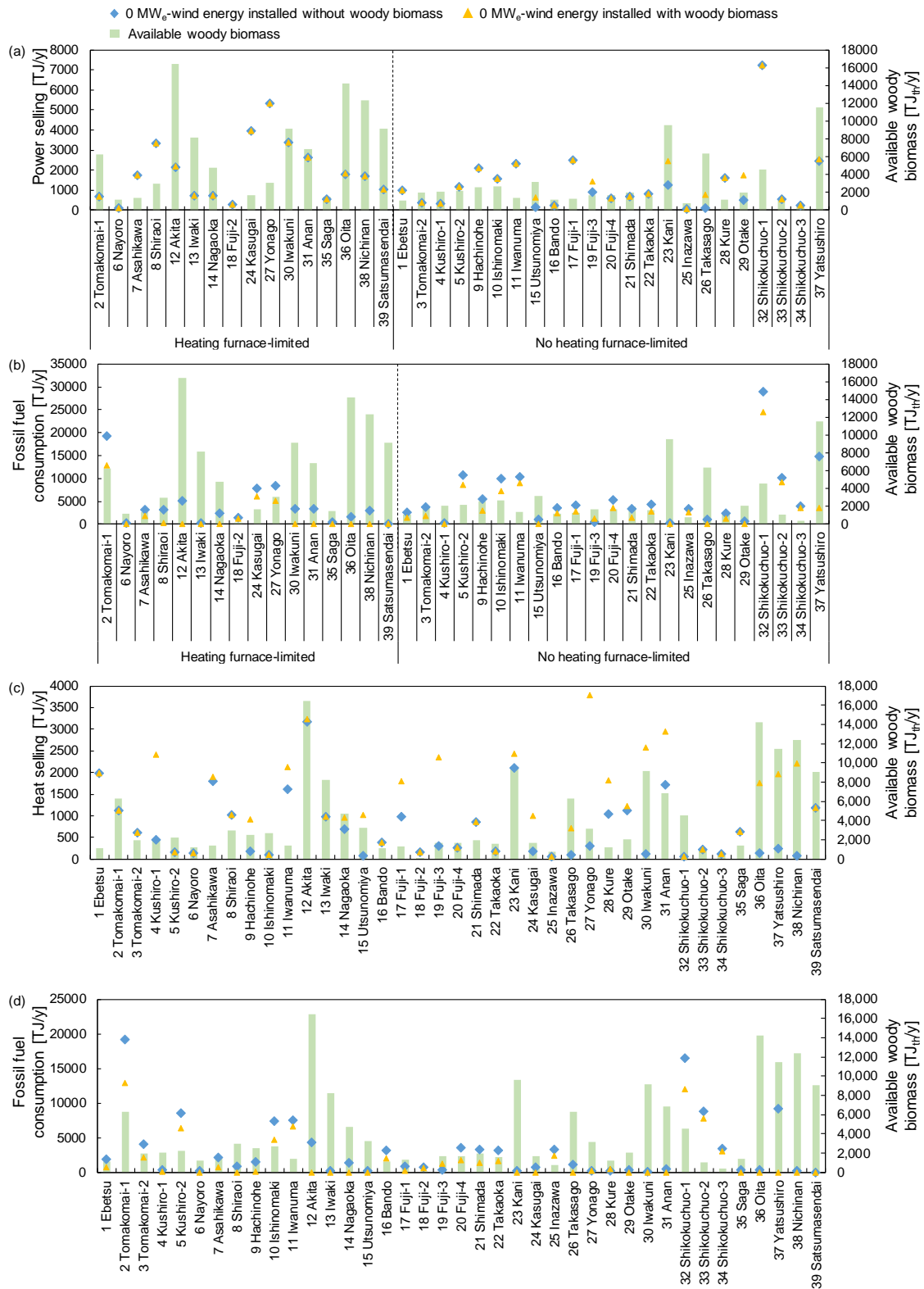


Figure 4-12. Comparison of LC-GHG with and without woody biomass. (a) Power selling. (b) Fuel consumption when to sell power. (c) Heat selling. (d) Fuel consumption when to sell heat.

## 4.4.蓄熱技術の導入量とエネルギー供給力

TES の導入量によって、TES を導入した熱電供給システムのエネルギー供給力は変化する。4 章で得られた結果を基に、TES の導入量とエネルギー供給力の関係を分析した。Figure 4-13 に風力を導入していない時、Figure 4-14 に風力を導入した時の TES 導入量とエネルギー供給量の関係を示す。縦軸は熱電供給システムから供給される電力の総量であり、売電量と製紙工場で使用する電力量の和である。Figure 4-13 と Figure 4-14 に示したどの条件でも、TES の導入量が増加するほど、熱電供給システムから供給される電力の総量は増加する。同じ TES 導入量の時を比較すると、熱供給量の多い工場の方が、売電量が多い傾向にあった。このことから、熱供給量が多い方が蓄熱された熱を効率良く利用できると考えられる。Figure 4-13 (b)と Figure 4-14 (b) で、TES の導入量が同じ場合、Heating furnace-limited である工場の方が、売電量が少ない傾向にあった。燃烧炉は蓄熱量が少ない時に出力が上がるため、TES の温度が下がるのを防ぎ、蓄熱された熱を効率的に利用できる。

風力を導入した場合、風力の導入量が多い工場では、風力由来の熱を蓄熱するため TES の導入量が増加した。工場の No. 4 と 5 はどちらも、検討した製紙工場の中で風力の導入ポテンシャルが最も高い釧路市内にある工場である。No. 7 は旭川市、No. 12 は秋田市、No. 13 はいわき市で、すべて風力の導入ポテンシャルが 1,000 MW<sub>e</sub>以上の地域である。これらの工場では、風力の導入により TES の導入量は大幅に増加したが、Figure 4-14 の他の工場と比べると、TES の導入量の割に発電量は少なかった。これらの工場では風力の導入量が多く、製紙工場外に風力熱発電を導入した 3.3.3 項の状態に近くなっていると考えられる。WEC<sub>th</sub>による発熱量は風速の 3 乗に比例するが、風速は変動が大きいため、TES の入熱が風力のみ依存すると、風速が弱い時の入熱量が少なく、TES の温度は下がりやすくなる。このため、風力の導入量が大きくなると TES の導入量の割に発電量は少なくなる。風力と TES を組み合わせる場合、風力以外の異なる出力パターンを持つ熱源を組み合わせることで TES の効率が上がり、発電量も増加すると考えられる。

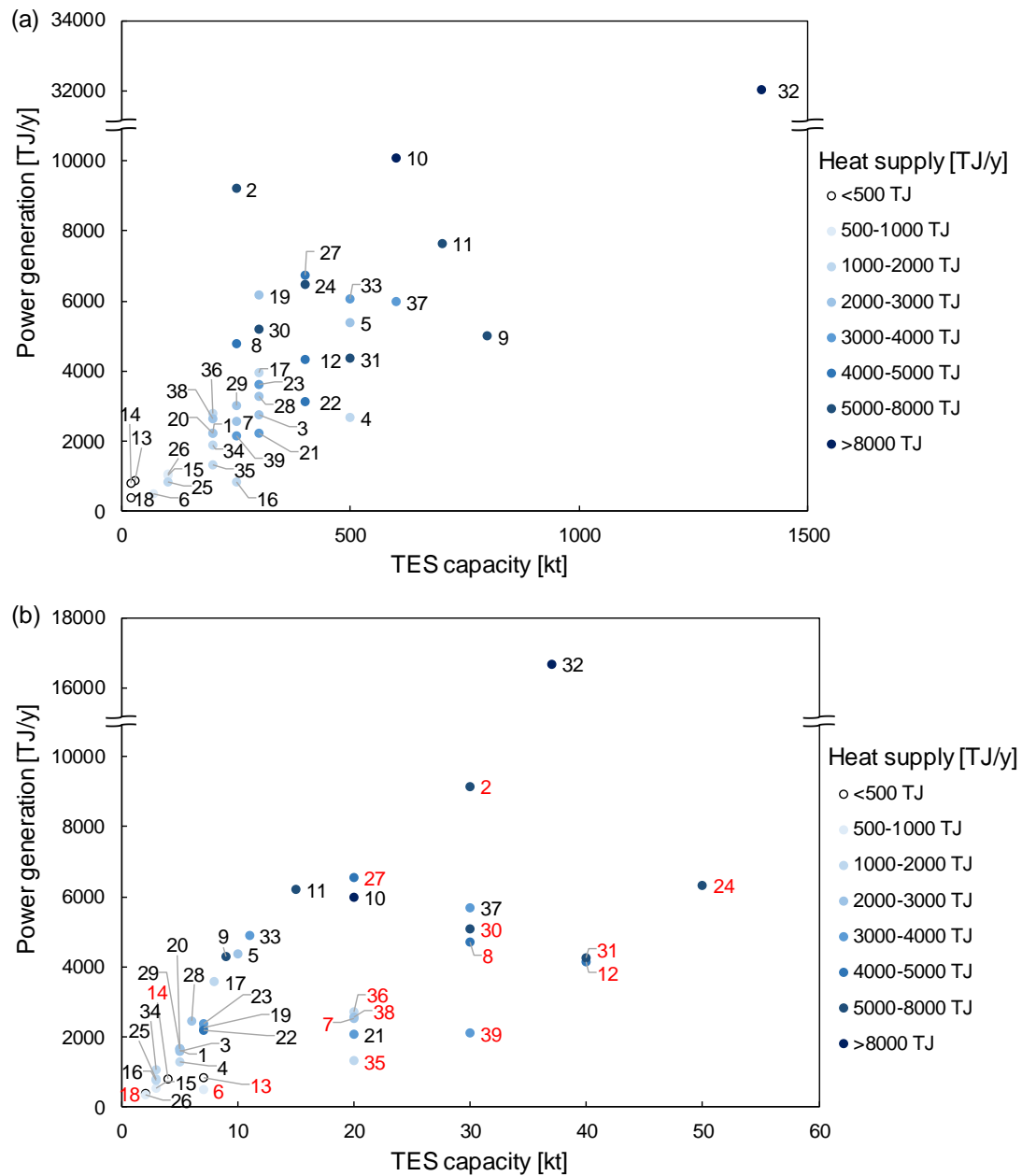


Figure 4-13. Comparison between TES capacity and the amount of energy supply without wind. The numbers near the points are the numbers of paper mills shown in Table 4-1. (a) When to maximize power selling. (b) When to minimizing LC-GHG. Red numbers are the paper mills of Heating furnace-limited.

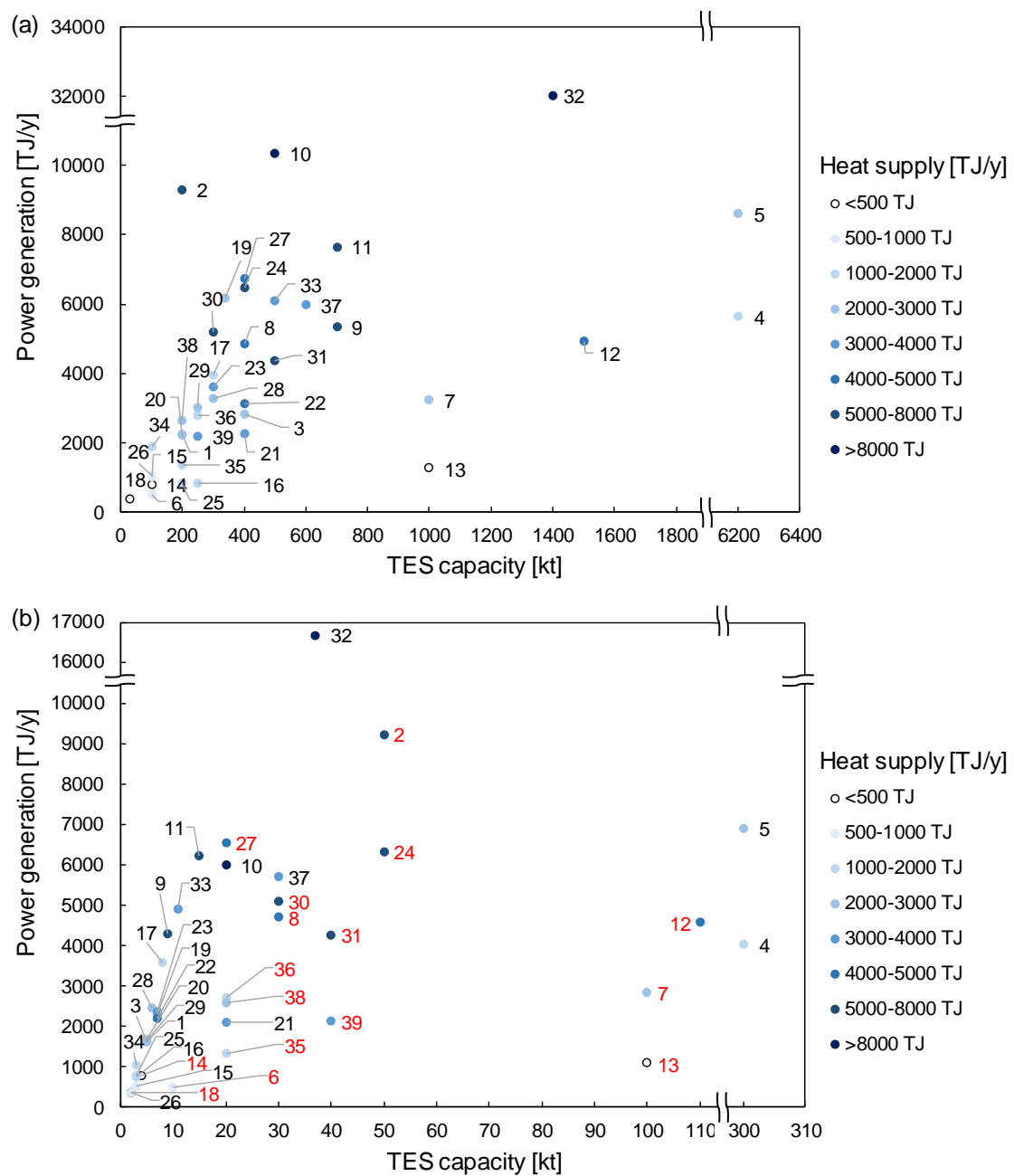


Figure 4-14. Comparison between TES capacity and the amount of energy supply with wind. The numbers near the points are the numbers of paper mills shown in Table 4-1. (a) When to maximize power selling. (b) When to minimizing LC-GHG. Red numbers are the paper mills of Heating furnace-limited.



本章では、第 3 章で構築したモデルを用いて日本各地にある製紙工場の TES と再エネの導入評価を行うことで、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証として、全国の製紙工場で LC-GHG を削減可能であることを示すことができた。TES と風力、木質バイオマスを導入することで、すべての工場で LC-GHG を削減できることを確認した。ただし、地域や工場の特徴により、導入効果の高い再エネは異なる。特に、燃烧炉の余力が少ない場合には、風力の導入により売電・売熱量が増加しやすいが、化石燃料は削減しづらく、バイオマスを導入した場合は、化石燃料を削減しやすい。燃烧炉の余力が大きい場合は、風力を導入することで化石燃料は削減しやすくなるが、売電・売熱量は変わらず、バイオマスを導入することで売電・売熱量を増加させやすくなる。風力の大きさなど地域によって異なる特徴はあるが、TES の導入量は熱電供給システムのエネルギー供給力と相関があり、熱電供給システムの規模の設計が可能であることがわかった。

## 第5章 変動性再エネを導入した熱電供給 システムの設計

---

### 5.1. 変動性再エネを調整するための蓄エネルギー 技術

第2章で提案した蓄熱技術を導入した熱電供給システムが、第3章と第4章で検討した工場への TES の導入評価による概念実証により、工場と地域が一緒にカーボンニュートラルを目指せるシステムであることを示すことができた。蓄エネ技術として、TES の他、蓄電池や水素貯蔵の導入プロジェクトが立ち上がっており[78, 79]、今後導入が増加することが予想される。本研究で提案した熱電供給システムにおいてカーボンニュートラルを実現するためには、他の蓄エネ技術と蓄熱技術を比較した概念実証を行い、導入に適した蓄エネ技術を選択する必要がある。第3章と第4章で構築した TES の導入評価のためのモデルを適応することで、蓄電池や水素貯蔵といった TES 以外の蓄エネ技術のライフサイクルにおける GHG 排出量を比較することが可能となり、導入するのに適切な蓄エネ技術を選択することが可能となる。そこで、TES、蓄電池（リチウムイオン電池）、水素貯蔵の比較を行うこととした。蓄熱した熱から蒸気を生成し蒸気タービンで発電する必要がある TES と比較して、蓄電池や水素貯蔵を用いた発電の方がエネルギーの利用効率は高いが、TES の方が希少金属の利用が少ない。そこで、TES、リチウムイオン電池、水素貯蔵を導入した時の売電量、LC-GHG の他、資源消費量の比較を行った。

#### 5.1.1. 蓄エネルギー技術比較のためのモデル

蓄エネ技術を比較するために設定したエネルギーフローを Figure 5-1 に示す。蓄電池の場合、蓄電池由来の電力を工場で使用することは可能だが、工場の熱電供給設備

由来の出力調整可能な電気を蓄電する必要はないため、工場の熱電供給設備と組み合わせる必要がない。そのため、蓄エネ技術の単純な比較として、工場の熱電供給設備とは組み合わせず、風力由来の蓄エネ技術に貯蔵し、電気として使用する場合の検討をすることとした。

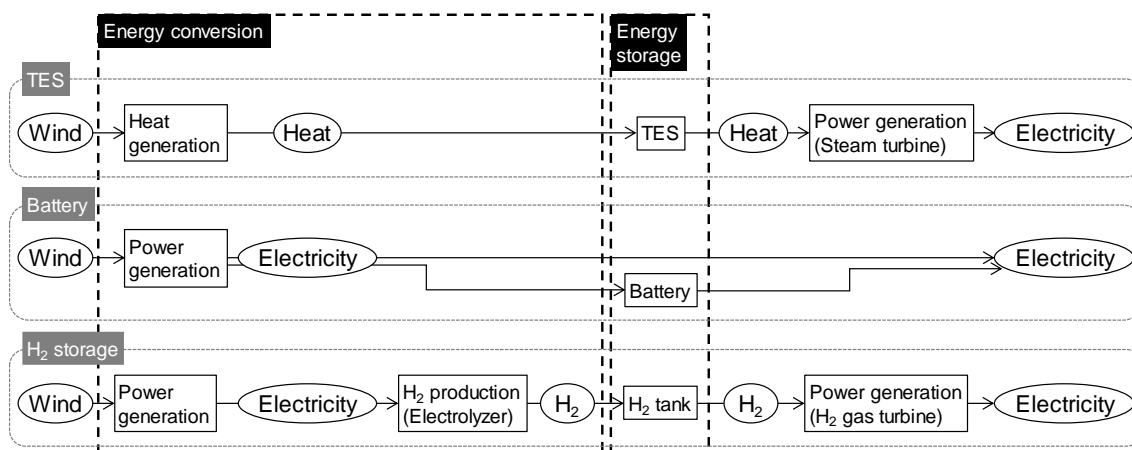


Figure 5-1. Energy flows of the systems installing energy storages.

風力の風速は Figure 3-6 と同じとし、風力から熱および電気への変換効率は Figure 3-5 と同じとした。売電量は 1 年間を通して一定とした。蓄エネ技術の導入量に対して風力が過剰な場合は、蓄エネ技術の上限までエネルギーを貯蔵し、残りは捨てるとした。水素貯蔵の場合は、水素に変換する前に捨てるとし、水素製造装置である電解装置の導入規模は、1 時間あたりに水素タンクに入る最大量の水素を製造可能な電解装置を導入するとした。したがって、電解装置の規模は、風力と水素タンクの導入量によって異なる。Table 5-1 に、蓄エネ技術を比較するために使用した技術設定を示す。

風力の導入規模は 2.1 MW<sub>e</sub>～100.8 MW<sub>e</sub> の範囲を 2.1 MW<sub>e</sub> ごとに検討した。蓄電池と水素貯蔵の導入規模は、1～10 MWh は 1 MWh ずつ、10～100 MWh は 10 MWh ずつ、100～200 MWh は 50 MWh ずつとし、TES 2 kt に相当する 229.3 MWh 以上では、3.3.3 項での検討と同様に、229.3～1146.5 MWh (TES 2～10 kt に相当) は 114.6 MWh (TES 1 kt に相当) ずつ、1146.5～3439.5 MWh (TES 10～30 kt に相当) は 229.3 MWh (TES 2 kt に相当) ずつ、3439.5～11465 MWh (TES 30～100 kt に相当) は 1146 MWh (TES 10 kt に相当) ずつ、11465 MWh 以上は 2866 MWh (TES 25 kt に相当) ずつ 34395 MWh (TES 300 kt に相当) まで検討した。TES は、Table 3-1 で設定した溶融塩の高さ (Minimum molten salt level height) を維持するため、高温・低温タンクでそれぞれ

れ溶融塩が約 500 t 必要であり、合計で 1 kt 以上の溶融塩が必要であることから、2 kt (229.3 MWh) 以上の場合を検討した。水素タンクの規模は、水素の燃焼熱の大きさに換算して示した。TES を導入した時は、第 3 章と第 4 章と同様に、蒸気タービンで発電し、水素は水素ガスタービンで発電した。売電する電気は一定とし、石炭火力発電を代替するとした。

Table 5-1. Parameter settings for comparing energy storages.

Technology	Parameter	Value
Li-ion battery	Daily self-discharge	0.2% [10]
	Discharge efficiency	85% [10]
	GHG intensity	396.5 kg-CO <sub>2</sub> eq/kWh [19]
	ARD	0.006798 kg-Sbeq/kWh [19]
	Life time	20 years [162]
Hydrogen production (PEM electrolyzer)	Electricity input for an electrolyzer	5.19 kWh/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> [34]
	Pure water requirement	0.804 kg/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> [34]
	GHG intensity	170 kg-CO <sub>2</sub> eq/kW [162]
	ARD	0.0504 kg-Sbeq/kW [162]
	Life time	10 years [162]
Hydrogen tank	Pressure (full)	19.6 MPa [163]
	Pressure (empty)	2 MPa [164]
	Temperature in the tank	15 °C [164]
	Internal diameter	2.4 m [165]
	Thickness of aluminum liner	5 mm [164]
	Density of aluminum liner	2700 kg/m <sup>3</sup> [164]
	Thickness of carbon fiber reinforced plastic (CFRP)	19.5 mm [164]
	Density of CFRP	1494 kg/m <sup>3</sup> [164]
	Thickness of structural steel	9 mm [164]
	Density of structural steel	7800 kg/m <sup>3</sup> [110]

Table 5-1. Parameter settings for comparing energy storages. (continued)

Hydrogen tank	Life time	15 years [166]
Hydrogen gas turbine	Efficiency (HHV)	51.3% [34]
	Capacity factor	70% [34]

### 5.1.2. 蓄エネルギー技術の導入評価

風力を調整するための蓄エネ技術として、TES、蓄電池、水素貯蔵を導入した時の売電量、LC-GHG、資源消費量の比較を行った。Figure 5-2 に売電量の結果を示す。1年間を通じて一定の量を売電し続けることとし、どの蓄エネ技術を導入した場合も、風力と蓄エネ技術の導入量が多いほど売電量は増加した。しかし、風力の導入量が同じ時には、蓄エネ技術の導入量が過剰になると、水素貯蔵では売電量が増加しなくなり、放熱や自己放電の起こる TES と蓄電池では、売電量は減少した。これは、蓄エネ技術に貯蔵されるエネルギー量の上限が風力によって決まるためである。蓄エネ技術を大量に導入しても、その導入量に見合った変動性再エネを得られなければ、蓄エネ技術の導入効果は得られない。Figure 5-3 に、Figure 5-2 で示した結果の中で、風力の導入量が 2.1、50.4、100.8 MW<sub>e</sub>の時を取り出した結果を示す。風力の導入量が同じ時は、風力の導入量に関わらず、TES、水素貯蔵、蓄電池の順で売電量は大きくなった。蓄電池を使用した場合は熱電変換などのエネルギー変換の回数が少ないため、売電量は多くなった。TES は、発電効率が低いため、TES の導入量の割に発電量が少なくなった。

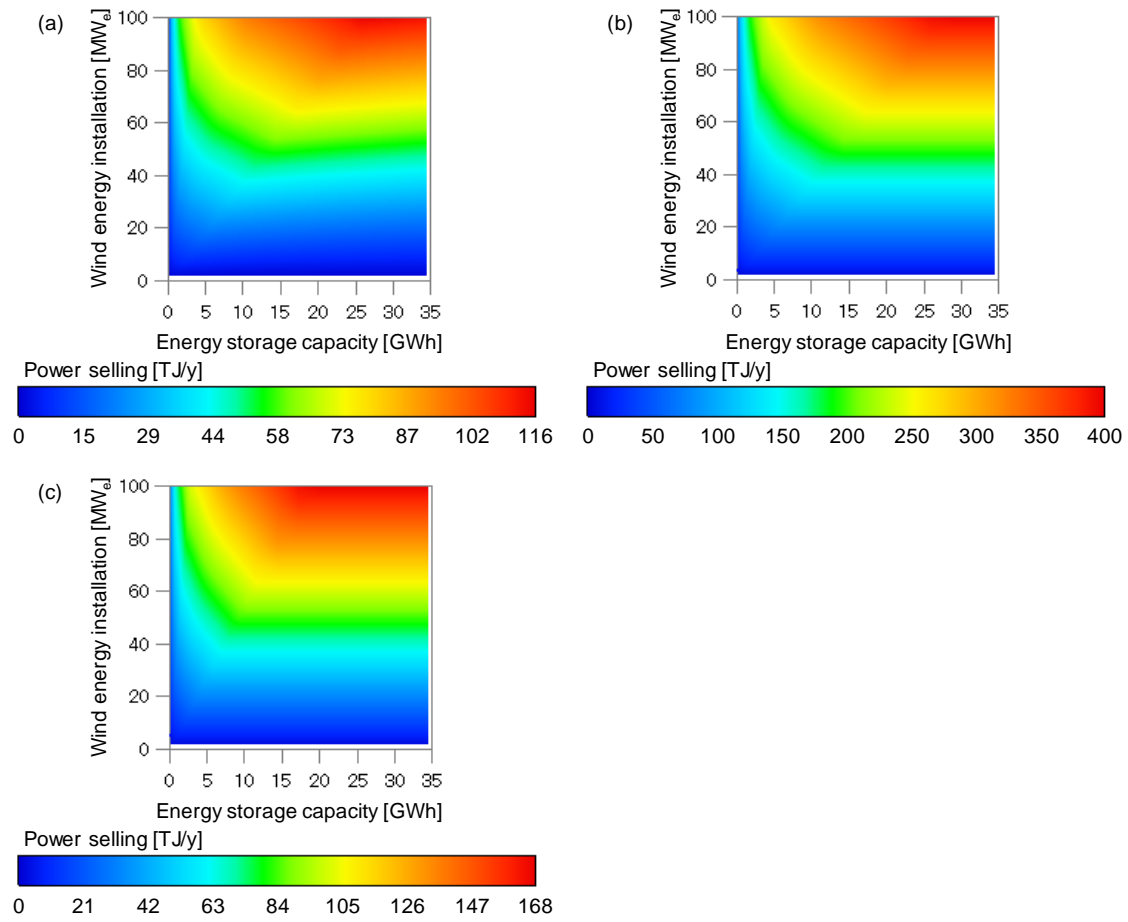


Figure 5-2. Power selling when using different energy storages. (a) TES. (b) Battery. (c) Hydrogen storage.

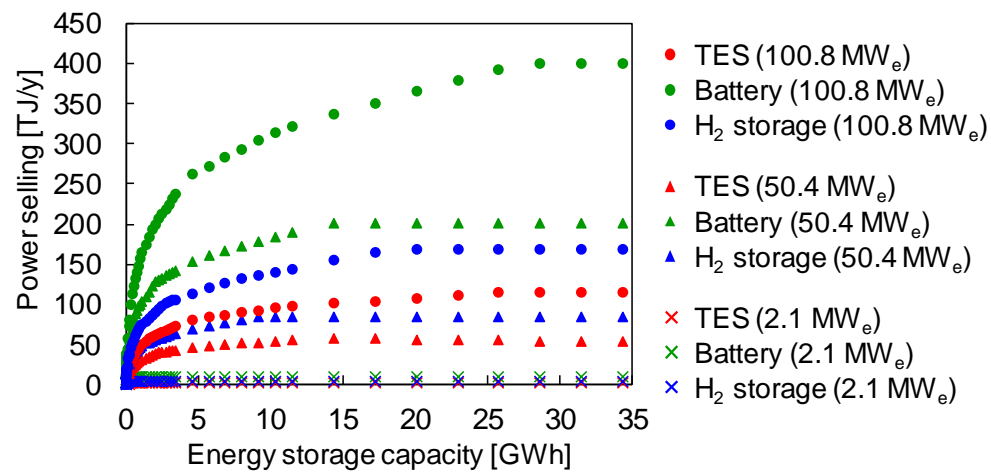


Figure 5-3. Power selling when using different energy storages with 2.1, 50.4 and 100.8 MW<sub>e</sub>-wind energy.

Figure 5-4 に LC-GHG の結果を示す。風力の導入量が少ないにもかかわらず蓄エネ技術の導入量が多い時は、LC-GHG が増加した。風力の導入量が少ないため、売電量が少なく、石炭火力発電由来の GHG を削減できないためである。TES と蓄電池を比較すると、蓄電池の製造時に排出される GHG が大きいため、相対的に風力の製造による GHG 排出量が小さくなり、蓄電池の導入量が多い場合は風力の導入量を増加させても LC-GHG を削減することが困難であることがわかった。一方、TES の導入量が多い時には風力の導入量を増加させることで LC-GHG を削減できる。水素貯蔵の場合は、風力の導入量に合わせて規模が大きくなる電解装置の製造由来の GHG が増加するため、水素タンクが小さくても風力の導入量が多いと LC-GHG は増加した。

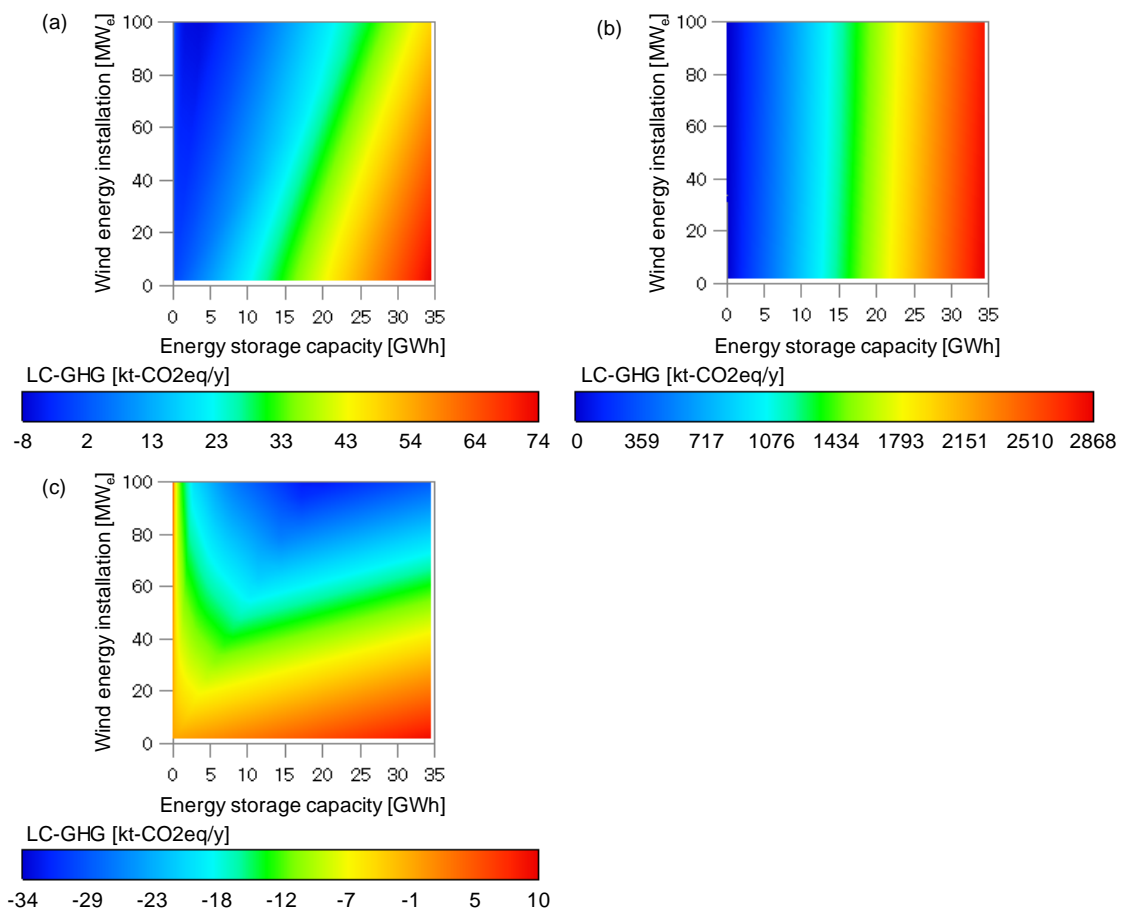


Figure 5-4. LC-GHG when using different energy storages. (a) TES. (b) Battery. (c) Hydrogen storage.

Figure 5-5 に、Figure 5-4 で示した LC-GHG のうち、風力の導入量が 2.1、50.4、100.8 MW<sub>e</sub> の時の結果を示す。(a)にはすべての結果を、(b)には 80 kt-CO<sub>2</sub>eq/y までの結

果を示す。蓄エネ技術の導入量による LC-GHG の大きさは、風力の導入量が 50.4 MW<sub>e</sub> の時は 0.02 MWh 以下、風力 100.8 MW<sub>e</sub> の時は 0.05 MWh 以下では、蓄電池の方が水素貯蔵より小さくなった。蓄エネ技術の導入量が大きい時は、LC-GHG が大きい順に、蓄電池、TES、水素貯蔵となった。

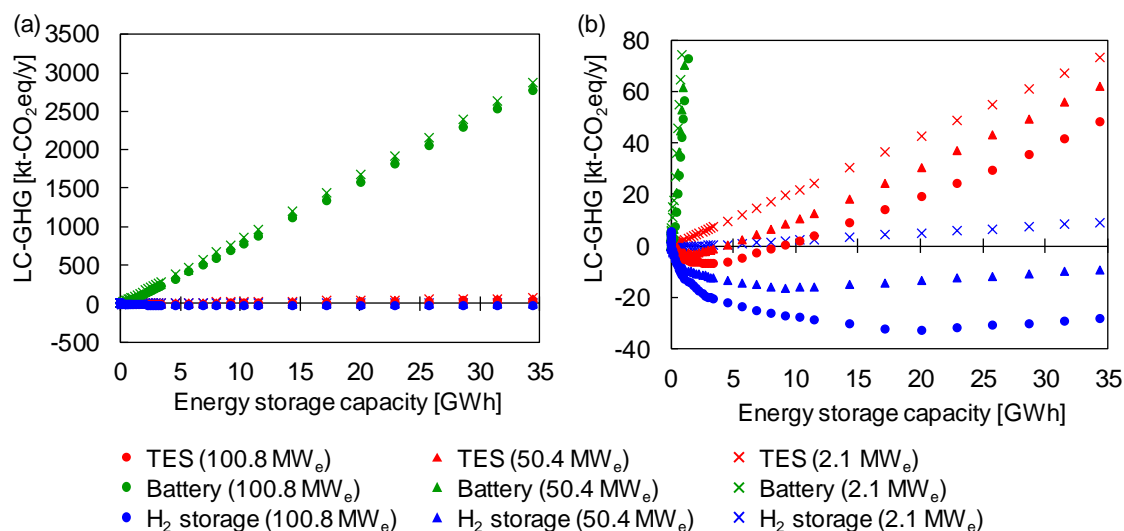


Figure 5-5. LC-GHG when using different energy storages with 2.1, 50.4 and 100.8 MW<sub>e</sub>-wind energy. (a) All results of LC-GHG. (b) Results of LC-GHG between -40 and 80 kt-CO<sub>2</sub>eq/y.

Figure 5-6 に資源消費量の結果を示す。風力と蓄エネ技術の導入量が多いほど資源消費量は増加した。石炭火力発電による資源消費量が小さく、売電をしても資源消費量は削減できないため、設備の導入量が多いほど資源消費量は増加する。蓄電池の場合は、蓄電池の製造による資源消費量が多く、風力導入による資源消費量の影響が相対的に小さくなり、蓄電池の導入量によって資源消費量の大きさが決まる。TES と水素貯蔵と比較して、蓄電池の資源消費量は大きくなることがわかった。



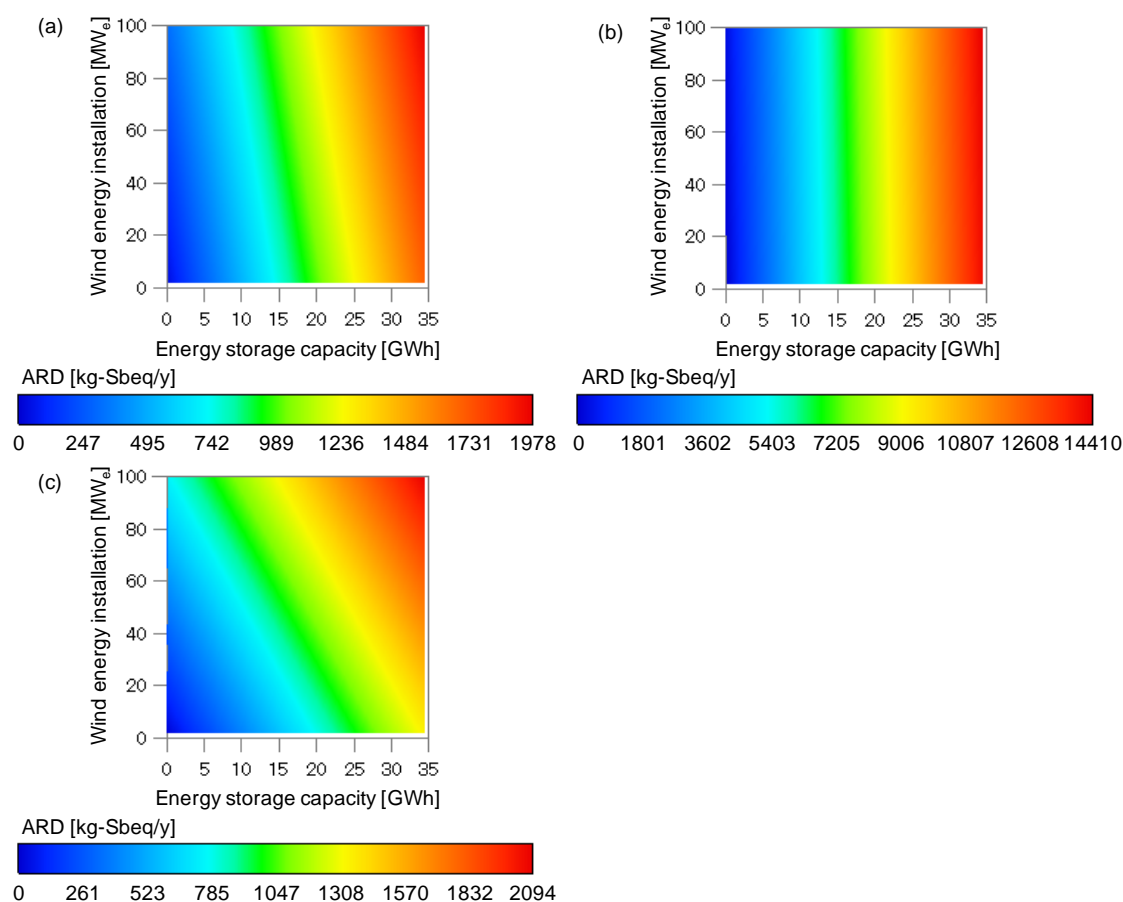


Figure 5-6. ARD when using different energy storages. (a) TES. (b) Battery. (c) Hydrogen storage.

Figure 5-7 に、風力の導入量が 2.1、50.4、100.8 MW<sub>e</sub>の時の資源消費量を示す。(a)には資源消費量のすべての結果を、(b)には 2500 kg-Sbeq/y までの結果を示す。水素貯蔵の場合は、風力の導入量が増加すると電解装置も大きくなるため、水素タンクが小さくても風力の導入量が大きいと資源消費量は大きくなる。風力 100.8 MW<sub>e</sub>の時、水素タンクが 0.2 MWh 以下では資源消費量が急激に増加し、0.2 MWh 以上では資源消費量の増加が緩やかになった (Figure 5-7 (b))。これは、0.2 MWh 以下では水素タンクが小さく風力由来の電力をすべて水素に変換できず、電解装置の導入量が小さくなっているためである。水素タンク 0.2 MWh 以下では、水素タンクと電解装置の製造による資源消費量が増加し、0.2 MWh 以上では風力の導入量 100.8 MW<sub>e</sub>に合わせた電解装置が導入され、水素タンクの製造による資源消費量分が増加する。TES、蓄電池、水素貯蔵の資源消費量を比較すると、風力と蓄エネ技術の両方の導入量の大きさによって、最小値を取る蓄エネ技術は変化する。

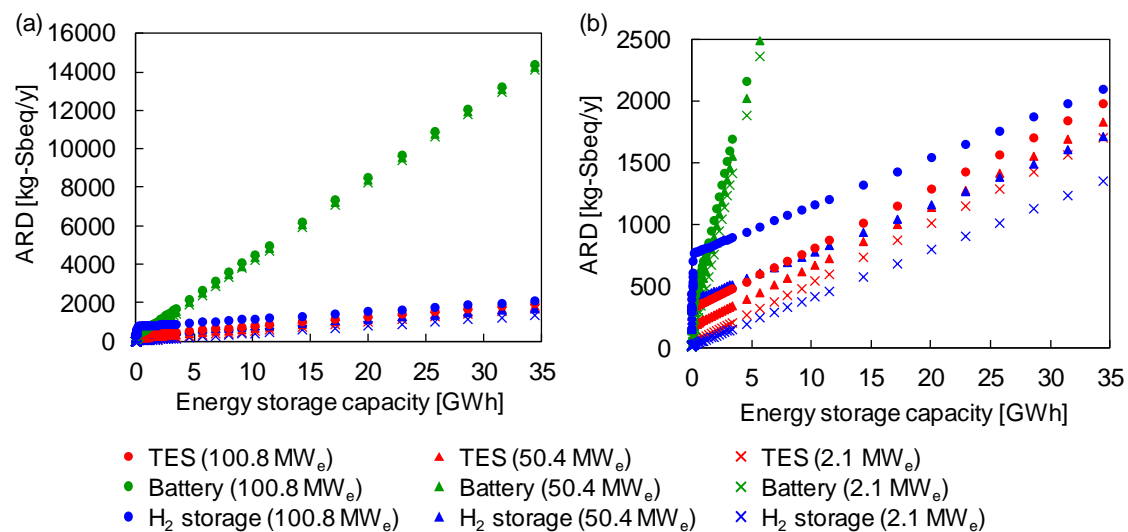


Figure 5-7. ARD when using different energy storages with 2.1, 50.4 and 100.8 MWe-wind energy. (a) All results of ARD. (b) Results of ARD between 0 and 2500 kg-Sbeq/y.

風力の導入量が 50.4 MWe の時は 0.02 MWh 以下、風力 100.8 MWe の時は 0.05 MWh 以下では、蓄電池の方が水素貯蔵に比べて売電量は大きく、LC-GHG と資源消費量は小さくなったため、導入する蓄エネ技術は蓄電池が適しているといえる。しかし、蓄電池は売電量が大きい、導入量が多いと他の 2 つの蓄エネ技術に比べて LC-GHG と資源消費量が大幅に大きくなるため、大規模な導入は不向きと考えられる。蓄エネ技術の導入量が多い時は TES か水素貯蔵が適しているといえるが、LC-GHG は水素貯蔵の小さく、資源消費量は TES の方が小さいため、LC-GHG と資源消費量はトレードオフの関係となっており、本研究で想定した条件ではどちらが適しているか決定することはできない。

水素を使用する場合は、水素をエネルギーとして利用するだけでなく、物質としての利用が可能である。現在でも水素はアンモニアの製造や、石油化学やガラス製造で使用されており[167]、将来的には、製鉄でも水素を還元剤として用いることが検討されている[88]。そのため、物質としての水素の物質としての需要がある場所では水素貯蔵を導入することが適していると考えられる。

TES を使用する場合は、蒸気タービンで発電するためエネルギーの利用効率が低い、電力のみを供給するより、熱としても利用することでエネルギー効率が向上し、LC-GHG や資源消費量を削減できると考えられる。熱を蒸気として利用する製紙

工場や食品工場がある地域や、地域熱供給をする場合には TES が適していると考えられる。

本節の検討は、単純な比較とするため、また、将来的に蓄エネや風力が大量導入されることを想定し、現在の技術成熟度に関わらず、大規模な設備を導入することを検討した。しかし、データは現在の設備のものを引用しており、実際に導入した時の LC-GHG や資源消費量とは異なる可能性がある。例えば、本節では蓄エネ設備のタンクの壁の厚みや材質は、導入量に関わらず引用文献と同じとし、1 つのタンクを導入することを想定した。しかし、大規模になることでタンクの厚みや材質が変わることや、タンクを複数に分ける可能性があると考えられる。水素製造のための電解装置は、風速の変動に合わせた運転をすることで効率低下するが、本節では、風速に追従して水素の製造量変動としたため、実際には水素製造の効率が下がることが想定される。または蓄電池と組み合わせて電解装置の効率を維持することが考えられる。蓄電池によって変動性再エネの出力調整することで、電解装置の規模を小さくし、電解装置稼働率を上げることが可能となり、LC-GHG が下がるが、資源消費量は増加することがわかっている[162]。大規模になることでスケールメリットが得られ、効率の上がる設備もあると考えられるが、本節ではスケールメリットは考慮せず、現在の設備と同等とした。

## 5.2. 熱電供給システムのエネルギー供給力と地域のエネルギー需要

本研究で提案した、これまでの蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証から実現につなげるためには、熱電供給システムのエネルギー供給力を決める必要がある。しかし、熱電供給システムのエネルギー供給力は、第3章で構築したモデルと第4章の検討結果からわかるように、地域の再エネ導入ポテンシャルなどの地域の特性によって決まるパラメータや、TES の導入規模など設計者の決められるパラメータなど、複数のパラメータから構成される関数によって求められる。また、地域のエネルギー政策によっても、熱電供給システムに必要なエネルギー供給力が変わることも考えられる。例えば、エネルギー政策として、系統電源との併用や、災害時のエネルギー供給の強靱化のために予備の供給力の確保、地域需要に対して再エネ導入ポテンシャルが多い地域では

域外へのエネルギー移出といったことが考えられる。地域のエネルギー政策などの要望を実現するために変更すべき設計変数を明確にするためにも、熱電供給システムの設計変数を整理する必要がある。

第3章と第4章の結果を基に、熱電供給システムのエネルギー供給力を決めるパラメータを整理したものを **Figure 5-8** に示す。熱電供給システムの電力の供給力は、TES の出熱量とタービンの能力によって、熱の供給力は TES の出熱量によって決まる。TES の出熱量は、TES の入熱量と、工場と地域の需要、タービンの効率、TES タンクの壁からの放熱によって決まる。工場の需要は生産量によって、地域の需要は人口と気候によって決まる。人口は、熱電供給システムがエネルギー供給をする範囲の人口であり、どの範囲までエネルギー供給をするかは設計変数として、地域や熱電供給システムの設計者が決める必要がある。TES タンクからの放熱量は、TES の出熱量の全体と比較して小さいが、TES の導入規模が過剰になると放熱量が増え、電力や熱への変換量が減少する（3.2 節参照）。TES の入熱量は、TES の規模、燃烧炉の能力と再エネの導入量によって決まる。再エネの導入量は、導入ポテンシャルによって上限が限られ、気候によって実際の TES の入熱量は変動するが、再エネの変換設備の導入量は設計変数となる。

以上より、熱電供給システムのエネルギー供給力の地域の特性によって決まる変数と、設計者の決められる設計変数に分けられる。地域の特性によって決まる変数は、再エネの導入ポテンシャルと、変動性再エネの出力や地域のエネルギー需要に影響を与える気候である。設計者が決められる設計変数は、TES の導入量、燃烧炉やタービンの性能、再エネの導入量と、エネルギー供給をする範囲である。第4章の検討では、生産量や燃烧炉の能力とタービンの効率は現状のまま、再エネ導入量は導入ポテンシャルの上限まで導入、エネルギー供給をする範囲は、製紙工場の位置する市町村とした。実際に設計する時には、既存設備を改修することや、再エネの導入量を調整すること、エネルギー供給をする範囲を市町村の一部にするか、隣接する市町村までエネルギー供給をすることも可能である。これらのパラメータは、工場や地域など、熱電供給システムのステークホルダー間で決める必要がある。

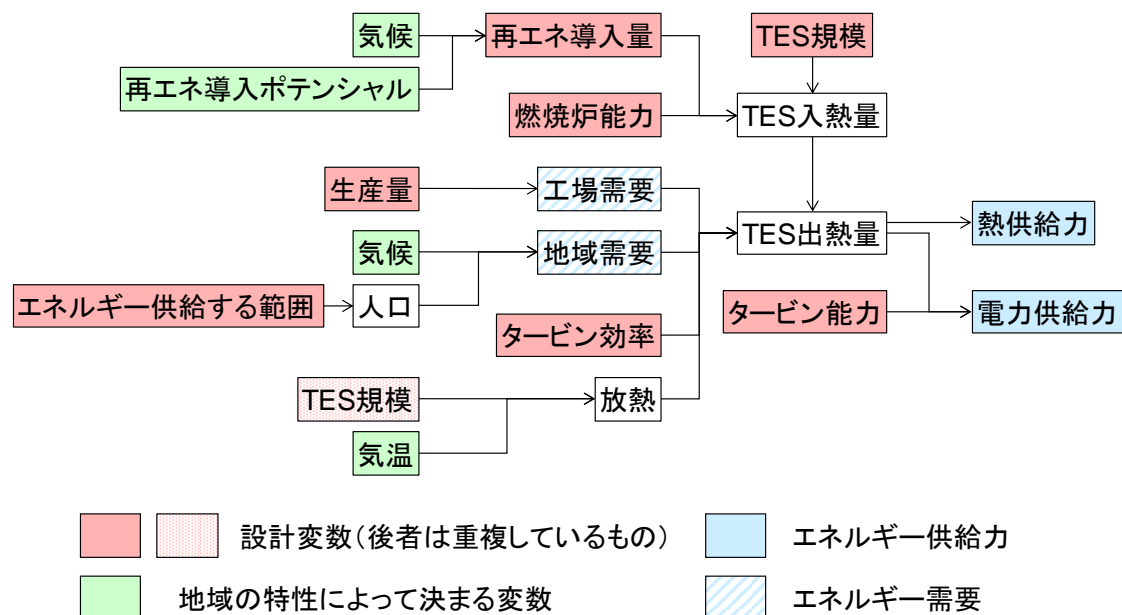


Figure 5-8. 熱電供給システムのエネルギー供給力を決めるパラメータ

### 5.3.変動性再エネを導入した熱電供給システムの ある工場と地域の在り方

これまでの概念実証より、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムが工場とその周辺地域でカーボンニュートラルの実現に貢献できることを示すことできた。本研究で提案してきた蓄熱技術を導入した熱電供給システムを概念実証から実現につなげるため、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムのある工場と地域の在り方を考察した。Figure 5-9 に蓄熱技術を導入した熱電供給システムの導入フローと効果を示す。熱電供給システムの設計者は、地域によって異なることが考えられるが、候補として、工場のエネルギー部門や、電力会社やガス会社、再エネや蓄エネを扱う新規エネルギー会社が考えられる。Figure 5-9 の中央に示した熱電供給システムに変動性再エネと蓄熱技術を導入するフローは、計画、詳細設計、導入、運用の段階に分けられる。Figure 5-9 の左右にはそれぞれ、熱電供給システムと、工場と地域の内外の間での情報やモノなどのフローを示す。再エネを導入した熱電供給システムにより得られる効果は点線の枠内に示した。

蓄熱技術を導入した熱電供給システムの計画は、概念実証、概念設計、基本設計から構成される。第2章で生成した代替案について、第3章と第4章で構築したモデルを用いてエネルギー収支のシミュレーションおよび評価を行う。本研究では主に概念実証を行ったが、構築したモデルやシミュレーション方法は、概念設計や基本設計でも利用可能であると考えられる。熱電供給システムの設計者は、地域の熱電供給システムの代替案を生成し、生成した代替案の評価をするために、工場の既存のエネルギー供給設備の仕様や、工場および地域のエネルギー需要データ、地域の再エネの導入ポテンシャルなどのデータを収集する。次に第3章と第4章で構築したモデルを基に対象工場と地域の熱電供給システムのモデルを構築し、エネルギー収支のシミュレーションを実施する。地域の熱電供給システムの計画では、熱電供給システムの設計者から工場や地域住民、自治体に情報提供として、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概要や得られる効果、リスクなどを説明し、工場や地域の意見などを取り入れ、合意を得る必要がある。工場や地域住民、自治体に熱電供給システムへの意見やデータを要求し、熱電供給システムのエネルギー供給力やGHG排出量などを評価し、評価結果を共有する。2.2節で提案した蓄熱技術を導入した熱電供給システムの計画をスムーズに行うために、2.1節で対象とすることとした熱電供給設備を持つ工場のある地域の自治体では、第4章の検討結果や、他地域の実績を参考にして、本計画を促進する地域のエネルギー政策が立案されることが望ましい。熱電供給システムの設計者と、工場や地域住民、自治体の間で、評価結果を共有や意見交換を行い、熱電供給システムの計画案を作成する。

計画案が作成されたら、詳細設計をエンジニアリング会社などに発注し、設計図に基づいて新設備を導入し、操業を開始する。再エネを導入した熱電供給システムによる効果は次のようなものが考えられる。再エネの導入により、工場と地域の両方でカーボンニュートラルの達成が期待でき、エネルギー自給率は向上する。工場では、熱電供給システムで利用できる既存設備の稼働率が上昇し、設備費の削減が見込める。地域では、雇用創出によって人口減対策や、域内の経済循環の活発化が期待でき、地方創世につなげることができる。地域の資源である再エネを利用することで、災害時のエネルギー供給の強靱化も可能となる。蓄熱技術を導入した熱電供給システムは、エネルギーの出力を調整することができるため、熱電供給システムに接続しない変動性再エネが増加しても、地域の需要に合わせてエネルギー供給することが可能である。また、エネルギー供給力に余裕のある地域では、再エネ由来のエネルギーを地域外へ移出することで収入を得たり、再エネ利用の基盤強化により新たな企業誘致にもつなげたりすることが可能となる。

蓄熱技術を導入した熱電供給システムの設計者は地域によって異なるため、熱電供給システムと工場や地域との関係性も、地域によって異なることが考えられる。熱電供給システムを設計する余力のある工場がある地域では、工場が熱電供給システムの設計およびエネルギー拠点の運用をすることが考えられる。その場合は、工場が中心となり、地域住民や自治体の合意を得ながら熱電供給システムを設計していくことが求められる。熱電供給システムを設計する能力や余力のない工場がある地域では、電力会社やガス会社、再エネや蓄エネを扱う新規エネルギー会社などが熱電供給システムの設計者としてふさわしいと考えられ、熱電供給システムの設計者は、工場や地域住民、自治体と協力していく必要がある。熱電供給システムの設計者が誰であれ、ステークホルダーは、それぞれの希望や持っている情報を共有し、熱電供給システムの在り方を決めることが求められる。

以上のように、現状の熱電供給システムを、再エネを導入したシステムに変えることで、GHG 排出量の多い製造業からの GHG 削減をするだけでなく、工場周辺の地域も一体となってカーボンニュートラルを実現することが期待できる。また、再エネを利用するための設備や蓄エネのための新たな設備を導入することによる雇用が発生し、経済循環を活発化させることで地方創生につなげられる。本研究で提案した、再エネを導入した熱電供給システムにより、製造業と地域のカーボンニュートラルと地方創生の実現が期待できる。

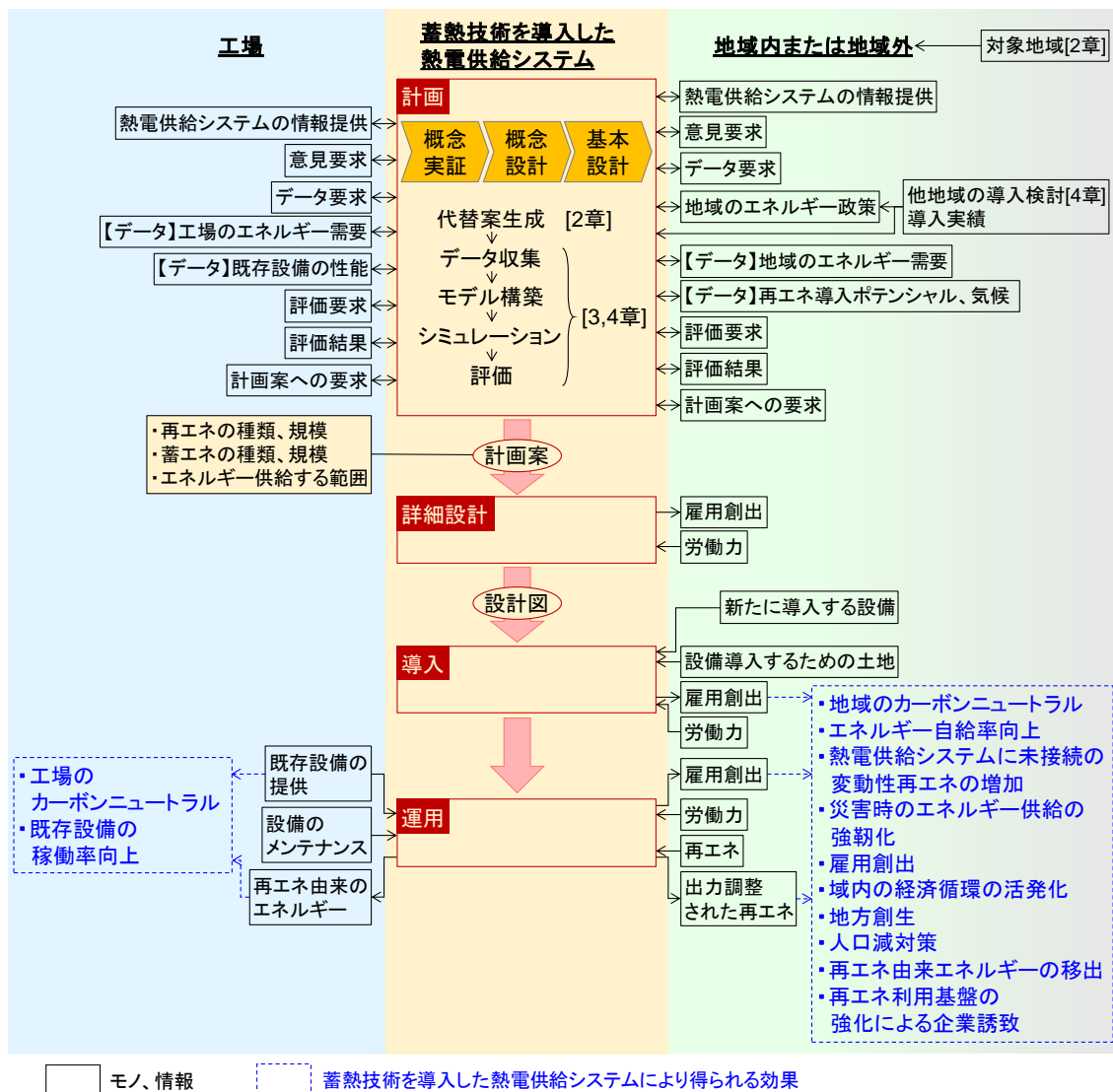


Figure 5-9. 蓄熱技術を導入した熱電供給システムの導入フローと効果



## 第6章 結論と今後の展望

---

### 6.1. 結論

製造業を持続可能なものへと変えるために、熱電供給設備を持つ工場を対象に、再エネを導入した熱電供給システムを提案した。以下に、本論文の各章および全体で達成したことを述べる。

第2章では、製造業で再エネの導入量を増加させるために、再エネと製造業の特徴を整理し、再エネの導入量の増加を検討する対象を絞り、エネルギーシステムの代替案を生成した。再エネの特徴として、日本の再エネの導入ポテンシャルの偏在性を調査した。再エネの種類によって、全国に分布しているものや、偏在しているものがある。次に、製造業の業種別の特徴を整理した。業種ごとの特徴として、エネルギーのうち電力の使用割合が高い業種と、電力以外のエネルギーを使用する業種があり、前者は系統電源を利用しており、後者は自家用発電設備および蒸気生成設備を所有していることが挙げられる。系統電源を使用している業種では、系統電源のGHG削減によって、GHGを削減することが可能である。一方、自家用発電設備を所有している鉄鋼、石油化学、窯業・土石、製紙の4業種は、製造業全体のGHG排出量の7割以上を占めている。それぞれの製造プロセス起因のGHG排出量も多く、業種ごとに対策されているが、電力や熱などのエネルギーの利用が多く、自家用の熱電供給設備を所有しており、系統電源のGHG削減だけでは十分なGHG削減効果を得られないため異なる対策が必要である。しかし、再エネによるエネルギー供給は地域との連携も必要であり、製造業にとっての専門外の領域である。そこで、本研究では、共通の課題がある熱電供給設備を持つ業種を対象とすることにした。熱電供給設備を持つ工場は全国各地に存在しており、各工場のある地域で得られる再エネを利用するために、エネルギーシステムの代替案として、蓄熱技術を導入した熱電供給システムを提案した。蓄熱技術を導入した熱電供給システムとは、再エネの変換および蓄エネのための設備を導入し、工場にある既存のエネルギー供給設備と組み合わせて、工場および地域にエネルギー供給をするシステムである。製造業と

地域の両方が抱える GHG 削減という課題の対策として、カーボンニュートラルの実現が期待できる熱電供給システムの代替案を生成することができた。

第3章では、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証を行うため、蓄熱技術を導入した製紙工場のモデルを構築し、エネルギー収支のシミュレーションによる評価を行った。TES の導入量を変えることで、売電・売熱量や LC-GHG は変化するが、売電・売熱量は TES の導入量に対して最大値を持ち、LC-GHG は TES の導入量に対して最小値を持つ。TES を過剰に導入することは、売電・売熱量を減少させ、製紙工場を含めた周辺地域全体の LC-GHG を増加させるため、TES の導入量は適切な規模とすべきである。風力を導入することで、売電・売熱量は増加し、LC-GHG は減少した。風力と蓄熱技術は、製紙工場のみ、または、地域のみで使用するより、製紙工場と地域を組み合わせの方が、製紙工場を含めた地域全体で LC-GHG の削減が可能である。製紙工場だけで風力を利用すると製紙工場の化石燃料しか削減できないが、地域で使用する石炭火力発電や熱需要のための化石燃料や電力を削減することで、LC-GHG の削減量は多くなるからである。また、風力は変動が大きく、蓄熱されてから使用するまでの期間が長くなりやすく、タンク壁からの放熱により蓄熱量が減少しやすいが、製紙工場の燃焼炉と組み合わせることで、TES の入出熱が頻繁に起こり、効率的なエネルギーの利用が可能となる。TES からの電力や熱の出力を制御することで、地域に売電と売熱の両方を行うことや、地域に導入された太陽光発電に合わせて、熱電供給システムから供給するエネルギーの出力を制御することが可能であることを示した。このように、蓄熱技術を導入した製紙工場を対象に、モデルを構築し、エネルギー収支のシミュレーションを行うことで、熱電供給システムにおける変動性再エネと蓄熱技術の導入効果を定量的に評価することが可能となった。工場と地域を組み合わせることで、効率的に変動性再エネを利用することが可能となり、熱電供給システムに接続されていない場合でも、地域の状況に合わせたエネルギー供給も可能となることがわかった。

第4章では、第3章で構築したモデルを全国に存在する製紙工場 39 か所に適用し、各工場における蓄熱技術や再エネの導入効果を評価することで、日本各地の製紙工場における蓄熱技術を導入した熱電供給システムでのカーボンニュートラルの実現可能性の概念実証を行った。紙の生産量やエネルギー供給設備の能力、気候など、工場や地域の特性を製紙工場ごとに設定し、エネルギー収支のシミュレーションを行った。各製紙工場からの売電・売熱量と LC-GHG を求め比較した。一部の製紙工場では、TES と  $WEC_{th}$  を導入し売電することで、TES と  $WEC_{th}$  の製造・廃棄や紙の生産による GHG 排出量よりも売電による GHG 削減量が上回り、LC-GHG が負になった。製紙工場からの売電で、

石炭火力発電ではなく LNGCC を代替することや、化石燃料の代わりに木質バイオマスとして地域の間伐材を用いる検討も行った。売電した電力を LNGCC で代替した時は、石炭火力発電を代替した時よりも LC-GHG は増加したが、木質バイオマスを使用することにより 37 工場で、TES のない現状よりも LC-GHG を削減できた。石炭火力発電を代替した時は TES と風力、木質バイオマスを導入することで、すべての工場で LC-GHG を削減できた。地域や工場の特徴により、導入効果の高い再エネは異なることがわかった。燃烧炉の余力が少ない場合、風力の導入により売電・売熱量が増加しやすいが、化石燃料は削減しづらく、バイオマスを導入した場合は、化石燃料を削減しやすい。燃烧炉の余力が大きい場合は、風力の導入により化石燃料は削減しやすいが、売電・売熱量は変わらず、バイオマスの導入により売電・売熱量を増加させやすくなる。風力の導入ポテンシャルなど地域によって異なる特徴はあるが、TES の導入量は熱電供給システムのエネルギー供給力と相関があり、熱電供給システムの規模の設計が可能であることがわかった。

第 5 章では、熱電供給システムへの導入に適した蓄エネ技術を選択するため、蓄熱技術と他の蓄エネ技術を比較した概念実証を行った。さらに、蓄熱技術を導入した熱電供給システムについて概念実証の段階から実現につなげるため、熱電供給システムのエネルギー供給力を決める設計変数を整理し、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムのある工場と地域の在り方を考察した。製造業のある地域において、導入する蓄エネルギー技術の選択支援につなげるために、第 3 章と第 4 章で構築した蓄熱技術の導入評価のモデルを用いて、TES、蓄電池、水素貯蔵技術の比較を行った。蓄エネ技術の導入量が多い時は TES か水素貯蔵が適しているといえるが、LC-GHG は水素貯蔵の小さく、資源消費量は TES の方が小さいため、LC-GHG と資源消費量はトレードオフの関係であった。そのため、TES と水素貯蔵のどちらを導入するかは、導入する地域の水素や熱の需要の有無を考慮することが必要だと考えられる。以上の検討より、蓄熱技術を導入した熱電供給システムが工場とその周辺地域でカーボンニュートラルの実現に貢献できることの概念実証をすることができた。蓄熱技術を導入した熱電供給システムについて概念実証の段階から実現につなげるため、熱電供給システムのエネルギー供給力を決めるためのパラメータを整理し、蓄熱技術を導入した熱電供給システムの設計フローおよび期待される効果を示した。熱電供給システムに求められるエネルギー供給力は、地域のとりうるエネルギー政策によって変わるが、再エネの導入ポテンシャルなど、地域の特性によって限定される条件もある。エネルギー供給力に影響を与えるパラメータのうち、地域の特性によって決まる変数は、再エネの導入ポテンシャルと、変動性再エネの出力や地域のエネルギー需要に影響を与える気候であり、設計者

が決められる設計変数は、TES の導入量、燃焼炉やタービンの性能、再エネの導入量と、エネルギー供給をする範囲である。蓄熱技術を導入した熱電供給システムの設計フローでは、熱電供給システムと工場、地域内外の関係性を表した。また、蓄熱技術を導入した熱電供給システムのある工場と地域の在り方を示した。現状の熱電供給システムを、蓄熱技術を導入したシステムに変えることで、GHG 排出量の多い製造業からの GHG を削減できるだけでなく、工場周辺の地域も一体となってカーボンニュートラルを実現することが期待できる。工場では既存設備の稼働率向上を見込むことができ、地域では再エネを利用するための設備や蓄エネのための新たな設備を導入することによる雇用が発生し、経済循環を活発化させることで地方創生につなげられる。本研究で提案した、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムは、製造業と地域の双方が抱える課題の解決につなげられることが明らかとなった。

本研究では、製造業によるエネルギー消費割合の高い地域でカーボンニュートラルを実現するための、蓄熱技術を導入した熱電供給システムを設計した。製紙工場を対象としたエネルギー収支のシミュレーションによる評価によって、変動性再エネを調整するための蓄熱技術を導入した熱電供給システムの概念実証をすることができた。本研究で行った、蓄エネ技術や変動性再エネの導入評価により、新たに導入する設備のライフサイクルを考慮した議論が可能となった。蓄エネ技術と変動性再エネの導入量ごとに、ライフサイクルを通した GHG 排出量や資源消費量を定量的に評価でき、導入量によって適切な蓄エネ技術が異なることが明らかになった。本研究で構築した蓄エネ技術や変動性再エネの導入評価のためのモデルにより、導入効果を定量的に推算することが可能となり、工場や地域の特徴に合わせて導入する蓄エネ技術を選択できるようになった。

本研究で提案した変動性再エネを導入した熱電供給システムは、工場では GHG 削減、地域では GHG 削減に加え経済活性化など、双方で効果が得られるシステムであり、Win-Win の関係を築くことが可能である。TES を導入した熱電供給システムについて、工場や地域の特性を考慮した導入評価をするためのモデルとシミュレーション方法を構築した。TES の導入による工場と地域における効果を定量的に理解して導入に向けた議論をすることが可能となった。また、TES を導入した熱電供給システムのある地域と工場の在り方を示したことで、工場と地域の目指す目標が明確になった。熱電供給システムに関わる地域と工場の役割や活動が明確となり、目標に向かった活動が促進されることが期待される。

## 6.2.今後の展望

今後、蓄熱技術を導入した熱電供給システムを計画し、実現性の高い設計につなげるため、個々の地域の状況をより詳細に検討可能な分析が必要だと考えられる。地域の詳細な特性として、地理的な位置情報や、近隣に熱電供給システムが複数ある場合を考慮できるモデルに変えていく必要がある。中長期的な熱電供給システムの変化として、蓄エネ技術による変動性再エネの出力調整以外の技術導入が進み、製造業とその周辺地域でカーボンニュートラルを実現するために利用可能な技術の組み合わせが増えることが予想される。そのため、本研究で構築した蓄熱技術の導入評価のためのモデルを適用し、様々な技術の組み合わせを検討可能なモデルに変えていく必要がある。また、本研究では評価できていない、蓄熱技術を導入した熱電供給システムによる経済効果を評価し、TES の導入計画が促進されることが望まれる。

- 地理的な位置情報の組み込み

熱は遠隔地への輸送が困難なため、地域熱供給によって売熱をする場合、熱の生成地点と利用地点の距離が重要となる。現状では地域熱供給用の熱配管の整備されていない地域が多いが、熱配管の敷設経路や配管サイズも含めた熱の輸送効率を考慮して、地域熱供給の実現可能性を評価する必要がある。地域熱供給による熱の供給可能な範囲を特定することは、熱電供給システムに求められるエネルギー供給力を決めることにつながる。

- 近隣に複数の熱電供給システムがある時や様々な技術の組み合わせを検討するためのモデル構築

近隣に複数の熱電供給システムがある場合、変動性再エネ由来のエネルギーの貯蔵先や地域へのエネルギー供給元を選択する必要がある。時刻によって各熱電供給システムの蓄熱量は変化するため、その時々で蓄熱またはエネルギー供給する熱電供給システムを選択する必要がある。本研究で構築したモデルと、エネルギーの貯蔵先と供給元を選択手法を組み合わせることで、近隣に複数の熱電供給システムがある場合のエネルギー供給力や LC-GHG は評価できると考えられる。複数の規模の異なる工場がある場合に、どの工場に優先的に TES を導入すべきか、といった傾向がわかれば、複数の熱電供給システムへの TES や変動性再エネの導入量を決めやすくなると考えられる。また、蓄エネ技術による変動性再エネの出力調整の他、系統電源の GHG 排出原単位の低下や DR の導入、製造業などからの排熱の利用などが進み、製造業とその周辺地域でカーボンニュートラル

トラルを実現するために利用可能な技術の組み合わせが増えることが予想される。今後導入が考えられる様々な技術の導入評価が可能なモデルへ変えていくことが求められる。

- 蓄熱技術を導入した熱電供給システムの経済性評価

本研究で提案した熱電供給システムには、TES や変動性再エネの変換設備には初期投資が必要であり、売電・売熱価格を設定し投資回収計画や収支計画を立てることが必要である。また、現状の熱電供給システムに、TES を導入することで雇用創出や経済活性化を見込めることは5章で示した通りである。地域で得られる経済効果を把握するために、TES を導入した熱電供給システムによる経済波及効果を定量的に評価することが求められる。

これらの取り組みによって、より詳細な地域の特徴を考慮した蓄エネ技術やその他の技術の導入評価を実施できるようになり、その地域に合わせた熱電供給システムを設計することが可能となる。また、本研究で提案した熱電供給システムを実現するには、地域の協力を得ることが必要であり、本研究で提案した熱電供給システムの実現を促進する地域のエネルギー政策が立案されることが望ましい。蓄エネ技術の導入効果を具体的に示されることはエネルギー政策の立案も促進でき、変動性再エネを導入した熱電供給システムの実現が加速することが期待できる。

## 参考文献

---

- [1] International Renewable Energy Agency, Renewable energy statistics 2021, 2021,
- [2] International Renewable Energy Agency, Renewable Power Generation Costs in 2019, 2020,
- [3] Agency for Natural Resources and Energy, FY2020 Annual Report on Energy (Energy White Paper 2020), 2020,
- [4] 資源エネルギー庁. 分散型エネルギープラットフォーム, 2021,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/bunsan\\_plat/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/bunsan_plat/)
- [5] N. Armaroli, V. Balzani, Towards an electricity-powered world, *Energy & Environmental Science*, 4 (2011) 3193-3222
- [6] Kyushu Electric Power Company, Incorporated. 2021, <https://www.kyuden.co.jp/index.html>
- [7] P.D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, J. Salpakari, Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45 (2015) 785-807
- [8] F. Cebulla, T. Naegler, M. Pohl, Electrical energy storage in highly renewable European energy systems: Capacity requirements, spatial distribution, and storage dispatch, *Journal of Energy Storage*, 14 (2017) 211-223
- [9] M. McPherson, B. Stoll, Demand response for variable renewable energy integration: A proposed approach and its impacts, *Energy*, 197 (2020)
- [10] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied Energy*, 137 (2015) 511-536
- [11] 資源エネルギー庁. 再エネの発電量を抑える「出力制御」、実は再エネの大量導入に役立つ?, 2021,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kyushu\\_syuturyokuseigyo.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kyushu_syuturyokuseigyo.html)
- [12] Y. Kanematsu, K. Oosawa, T. Okubo, Y. Kikuchi, Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: A case study of Tanegashima, Japan, *Applied Energy*, 198 (2017) 160-172
- [13] International Energy Agency, The Power of Transformation, IEA, 2014,
- [14] K.O. Adu-Kankam, L.M. Camarinha-Matos, Towards collaborative Virtual Power Plants: Trends and convergence, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 16 (2018) 217-230

- [15] M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Hosseinzadeh, H. Yousefi, S.T. Khorasani, Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (2018) 33-50
- [16] S. Koohi-Fayegh, M.A. Rosen, A review of energy storage types, applications and recent developments, *Journal of Energy Storage*, 27 (2020)
- [17] Environmental and Energy Study Institute. Fact Sheet | Energy Storage (2019) | White Papers | EESI, 2021, <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>
- [18] D. Deng, Li - ion batteries: basics, progress, and challenges, *Energy Science & Engineering*, 3 (2015) 385-418
- [19] M.A. Cusenza, S. Bobba, F. Ardente, M. Cellura, F. Di Persio, Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles, *Journal of Cleaner Production*, 215 (2019) 634-649
- [20] H. Zhang, W. Lu, X. Li, Progress and Perspectives of Flow Battery Technologies, *Electrochemical Energy Reviews*, 2 (2019) 492-506
- [21] R. Bhandari, C.A. Trudewind, P. Zapp, Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review, *Journal of Cleaner Production*, 85 (2014) 151-163
- [22] International Energy Agency, Technology Roadmap - Energy Storage – Analysis - IEA, IEA, 2014,
- [23] G. Alva, Y. Lin, G. Fang, An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, 144 (2018) 341-378
- [24] E. Batuecas, C. Mayo, R. Díaz, F.J. Pérez, Life Cycle Assessment of heat transfer fluids in parabolic trough concentrating solar power technology, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 171 (2017) 91-97
- [25] W.D. Steinmann, C. Odenthal, M. Eck, System Analysis and Test Loop Design for the CellFlux Storage Concept, *Energy Procedia*, 49 (2014) 1024-1033
- [26] R. Gabbrielli, C. Zamparelli, Optimal design of a molten salt thermal storage tank for parabolic trough solar power plants, *Journal of Solar Energy Engineering*, 131 (2009) 041001
- [27] M. Gimeno-Gutiérrez, R. Lacal-Arántegui, Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage based on two existing reservoirs, *Renewable Energy*, 75 (2015) 856-868
- [28] B. Bolund, H. Bernhoff, M. Leijon, Flywheel energy and power storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (2007) 235-258
- [29] J. Ma, Y. Li, N.S. Grundish, J.B. Goodenough, Y. Chen, L. Guo, Z. Peng, X. Qi, F. Yang, L. Qie, C.-A. Wang, B. Huang, Z. Huang, L. Chen, D. Su, G. Wang, X. Peng, Z. Chen, J. Yang, S. He, X. Zhang, H. Yu, C. Fu, M. Jiang, W. Deng, C.-F. Sun, Q. Pan, Y. Tang, X. Li, X. Ji, F. Wan, Z. Niu, F. Lian, C. Wang, G.G. Wallace, M. Fan, Q. Meng, S. Xin, Y.-G. Guo, L.-J. Wan, The 2021 battery technology roadmap, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54 (2021)



- [30] Z. Yang, J. Zhang, M.C.W. Kintner-Meyer, X. Lu, D. Choi, J.P. Lemmon, J. Liu, Electrochemical Energy Storage for Green Grid, *Chemical Reviews*, 111 (2011) 3577-3613
- [31] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, J. Maddy, The survey of key technologies in hydrogen energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2016) 14535-14552
- [32] K. Müller, W. Arlt, Status and Development in Hydrogen Transport and Storage for Energy Applications, *Energy Technology*, 1 (2013) 501-511
- [33] L. Blum, R. Deja, R. Peters, D. Stolten, Comparison of efficiencies of low, mean and high temperature fuel cell Systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36 (2011) 11056-11067
- [34] A. Ozawa, Y. Kudoh, N. Kitagawa, R. Muramatsu, Life cycle CO<sub>2</sub> emissions from power generation using hydrogen energy carriers, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (2019) 11219-11232
- [35] K. Vignarooban, X. Xu, A. Arvay, K. Hsu, A.M. Kannan, Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review, *Applied Energy*, 146 (2015) 383-396
- [36] S. Kuravi, J. Trahan, D.Y. Goswami, M.M. Rahman, E.K. Stefanakos, Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Progress in Energy and Combustion Science*, 39 (2013) 285-319
- [37] T. Okazaki, Y. Shirai, T. Nakamura, Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage, *Renewable Energy*, 83 (2015) 332-338
- [38] W.-D. Steinmann, H. Jockenhöfer, D. Bauer, Thermodynamic analysis of high-temperature carnot battery concepts, *Energy Technology*, 8 (2020) 1900895
- [39] International Energy Agency. Carnot Batteries, 2021, <https://iea-eces.org/annex-36/>
- [40] T. Okazaki, Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia, *Renewable Energy*, 151 (2020) 563-574
- [41] 岡崎徹, 蓄熱発電の最新開発動向, 「化学工学」 (会誌) , 83 (2019) 521
- [42] E. Oró, A. Gil, A. de Gracia, D. Boer, L.F. Cabeza, Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants, *Renewable Energy*, 44 (2012) 166-173
- [43] 総務省. 総務省 | 統計基準・統計分類 | 日本標準産業分類 (平成 25 年 10 月改定) (平成 26 年 4 月 1 日施行) 一分類項目名, 2021, [https://www.soumu.go.jp/toukei\\_toukatsu/index/seido/sangyo/02toukatsu01\\_03000044.html](https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/sangyo/02toukatsu01_03000044.html)
- [44] United Nations. THE 17 GOALS | Sustainable Development, 2021, <https://sdgs.un.org/goals>
- [45] International Energy Agency. Global CO<sub>2</sub> emissions by sector, 2019, 2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019>
- [46] Ministry of the Environment, Japan's National Greenhouse Gas Emissions in Fiscal Year 2019 (Preliminary Figures) [MOE], 2020,

- [47] 資源エネルギー庁, 「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告書」 (エネルギー白書 2021) , 2021,
- [48] Y. Kikuchi, Y. Kanematsu, R. Sato, T. Nakagaki, Distributed cogeneration of power and heat within an energy management strategy for mitigating fossil fuel consumption, *Journal of Industrial Ecology*, 20 (2016) 289-303
- [49] 資源エネルギー庁. 「カーボンニュートラル」 って何ですか? (前編) 〜いつ、誰が実現するの?, 2021,  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon\\_neutral\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/carbon_neutral_01.html)
- [50] Global 100% Renewable Energy Platform. 2021, <http://www.global100re.org/#team-1>
- [51] Climate Group, CDP, RE100 - We are accelerating progress towards 100% renewable power, (2021)
- [52] 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省, 2021 年版ものづくり白書, 2021,
- [53] Zulqarnain, M.H.M. Yusoff, M. Ayoub, M. Hamza Nazir, I. Zahid, M. Ameen, W. Abbas, N.F. Shoparwe, N. Abbas, Comprehensive Review on Biodiesel Production from Palm Oil Mill Effluent, *ChemBioEng Reviews*, 8 (2021) 439-462
- [54] B.S. Zainal, M.A. Ahmad, M. Danaee, N. Jamadon, N.S. Mohd, S. Ibrahim, Integrated System Technology of POME Treatment for Biohydrogen and Biomethane Production in Malaysia, *Applied Sciences*, 10 (2020)
- [55] M.A. Zuber, W.J. Yahya, A.M. Ithnin, D.A. Sugeng, H.A. Kadir, M.A. Ahmad, A brief review of palm oil liquid waste conversion into biofuel, *Environmental Reviews*, (2019) 1-10
- [56] M.S.C. Rao, M.M. Vijayalakshmi, T.R. Praveenkumar, Behaviour of green concrete (blended concrete) using agro-industrial waste as partial replacement of cement along with nanoparticles, *Applied Nanoscience*, (2021)
- [57] J.B. Jamora, S.E.L. Gudia, A.W. Go, M.B. Giduquio, J.W.A. Orilla, M.E. Loretero, Potential reduction of greenhouse gas emission through the use of sugarcane ash in cement-based industries: A case in the Philippines, *Journal of Cleaner Production*, 239 (2019)
- [58] M.A. Trezza, A.N. Scian, Burning wastes as an industrial resource, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 137-144
- [59] A. Tsiliyannis, C. Tsiliyannis, Renewable energy in cement manufacturing: A quantitative assessment of energy and environmental efficiency of food residue biofuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107 (2019) 568-586
- [60] K.J. Gondwe, S.S. Chiotha, T. Mkandawire, X. Zhu, J. Painuly, J.L. Taulo, An assessment of crop residues as potential renewable energy source for cement industry in Malawi, *Journal of Energy in Southern Africa*, 28 (2017)
- [61] C. Tregambi, R. Solimene, F. Montagnaro, P. Salatino, M. Marroccoli, N. Ibris, A. Telesca, Solar-driven production of lime for ordinary Portland cement formulation, *Solar Energy*, 173 (2018) 759-768

- [62] D.R. Raymond, Alternative energy sources and technologies for the pulp and paper industry, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 57-58 (1996) 763-775
- [63] E. Mäki, H. Saastamoinen, K. Melin, D. Matschegg, H. Pihkola, Drivers and barriers in retrofitting pulp and paper industry with bioenergy for more efficient production of liquid, solid and gaseous biofuels: A review, *Biomass and Bioenergy*, 148 (2021)
- [64] E.A. Carnevale, L. Ferrari, S. Paganelli, Investigation on the feasibility of integration of high temperature solar energy in a textile factory, *Renewable Energy*, 36 (2011) 3517-3529
- [65] T. Muneer, S. Maubleu, M. Asif, Prospects of solar water heating for textile industry in Pakistan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10 (2006) 1-23
- [66] D. Oosthuizen, N.J. Goosen, S. Hess, Solar thermal process heat in fishmeal production: Prospects for two South African fishmeal factories, *Journal of Cleaner Production*, 253 (2020)
- [67] B. Sturm, S. Meyers, Y. Zhang, R. Law, E.J. Siqueiros Valencia, H. Bao, Y. Wang, H. Chen, Process intensification and integration of solar heat generation in the Chinese condiment sector – A case study of a medium sized Beijing based factory, *Energy Conversion and Management*, 106 (2015) 1295-1308
- [68] S. Foteinis, J.M. Monteagudo, A. Duran, E. Chatzisyneon, Environmental sustainability of the solar photo-Fenton process for wastewater treatment and pharmaceuticals mineralization at semi-industrial scale, *Sci Total Environ*, 612 (2018) 605-612
- [69] A. Sgobba, C. Meskeel, Impact of Combined Heat and Power on the goal of decarbonizing energy use in Irish manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 278 (2021)
- [70] M.R. Chertow, INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy, *Annual Review of Energy and the Environment*, 25 (2000) 313-337
- [71] N.B. Jacobsen, Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects, *Journal of Industrial Ecology*, 10 (2006) 239-255
- [72] M.R. Chertow, “Uncovering” Industrial Symbiosis, *Journal of Industrial Ecology*, 11 (2007) 11-30
- [73] P. Ghisellini, C. Cialani, S. Ulgiati, A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner Production*, 114 (2016) 11-32
- [74] L. Zhang, Z. Yuan, J. Bi, B. Zhang, B. Liu, Eco-industrial parks: national pilot practices in China, *Journal of Cleaner Production*, 18 (2010) 504-509
- [75] Y. Kikuchi, Y. Kanematsu, M. Ugo, Y. Hamada, T. Okubo, Industrial Symbiosis Centered on a Regional Cogeneration Power Plant Utilizing Available Local Resources: A Case Study of Tanegashima, *Journal of Industrial Ecology*, 20 (2016) 276-288
- [76] S. Fujii, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, T. Nakagaki, Material and heat flow analysis in thermal energy storage and transport system utilizing unused heat from bagasse boiler, *Mechanical Engineering Journal*, 3 (2016) 16-00334-00316-00334

- [77] 兼松祐一郎, 大久保達也, 菊池康紀, 農林業地域における産業共生の計画プロセスのアクティビティモデルとデータモデル, 化学工学論文集, 43 (2017) 347-357
- [78] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 先進・革新蓄電池材料評価技術開発 (第2期), 2021, [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100146.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100146.html)
- [79] 経済産業省. 水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装計画を策定しました, 2021, <https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210518003/20210518003.html>
- [80] 環境省. 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書, 2021, <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/report/r01.html>
- [81] 資源エネルギー庁. 総合エネルギー統計, 2021, [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/index.html](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/index.html)
- [82] 環境省. 平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書, 2013, <https://www.env.go.jp/earth/report/h25-03/>
- [83] 国土地理院. 全国都道府県市区町村別面積調, 2021, <https://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO-title.htm>
- [84] 経済産業省. 工業統計調査 調査の結果, 2021, <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2.html>
- [85] 日本鉄鋼連盟. 鉄をつくる, 2021, <https://www.jisf.or.jp/kids/shiraberu/index.html#>
- [86] 新日鉄住金, カラー図解 鉄と鉄鋼がわかる本, 日本実業出版社, 東京, 2014
- [87] 日本製鉄, エネルギー・マテリアル・バランス | 日本製鉄の環境経営 | 環境 | サステナビリティ | 日本製鉄, (2021)
- [88] D. Spreitzer, J. Schenk, Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—A Review, steel research international, 90 (2019)
- [89] T. Ariyama, Perspective toward Long-term Global Goal for Carbon Dioxide Mitigation in Steel Industry, Tetsu-to-Hagane, 105 (2019) 567-586
- [90] 石油化学工業協会. Let' Study 石油化学～石油化学製品はこうしてつくる～, 2021, <https://www.jpca.or.jp/studies/junior/howto.html>
- [91] セメント協会. セメントとは, 2021, <https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jd1.html#02>
- [92] デイ・シイ. セメントの製造工程, 2021, <http://www.dccorp.jp/business/cement/flow.html>
- [93] T. Hosoya, Concrete Journal, 48 (2010) 51-53
- [94] 資源エネルギー庁. コンクリート・セメントで脱炭素社会を築く！？技術革新で資源もCO2も循環させる, 2022, [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/concrete\\_cement.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/concrete_cement.html)
- [95] 日本製紙連合会. 紙の製造工程～主にチラシやカタログとなる紙を作る工程を紹介します～, 2021, [https://www.jpa.gr.jp/p-world/p\\_seizou/koutei.pdf](https://www.jpa.gr.jp/p-world/p_seizou/koutei.pdf)

- [96] 大王製紙. 大王製紙の「紙ができるまで」のページです | 大王製紙株式会社, 2021, <https://www.daio-paper.co.jp/paper/>
- [97] 日本製紙. 紙の豆知識 チップ君の工場見学, 2021, <https://www.nipponpapergroup.com/knowledge/chip/factory1.html>
- [98] 日本製紙連合会. 紙のあれこれ 用語集, 2021, <https://www.jpa.gr.jp/glossary/index.html>
- [99] Thermal and Nuclear Power Engineering Society, Handbook on facilities of thermal and nuclear power plant (in Japanese), Thermal and Nuclear Power Engineering Society, Tokyo, 2017
- [100] 酒匂孝之, 内平直志, 概念実証の観点から見た研究成果事業化のための知識共有の分析, 産学連携学, 17 (2021) 2\_91-92\_101
- [101] 梅田綾子, 技術の社会実装に向けた理論と実践, 東京海洋大学博士論文, (2018)
- [102] Japan Cogeneration Center, Special topic: Factory report of Tokushima area (5) Tomioka mill, Oji Paper Co., Ltd., CGS NEWS, 2 (2010) 22-24
- [103] Japan Paper Association. Process of paper production (in Japanese), 2021, [https://www.jpa.gr.jp/p-world/p\\_seizou/koutei.pdf](https://www.jpa.gr.jp/p-world/p_seizou/koutei.pdf)
- [104] N. Miyata, Y. Kikuchi, M. Hirao, Scenario Analysis on Pulp and Paper Flow for the Design of Paper Recycling System, The 9th International Conference on EcoBalance, 2010,
- [105] Oji Paper Co., Ltd., Kasugai Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 71 (2017) 927-934
- [106] Paper Recycling Promotion Center, Waste paper handbook 2017, 2017,
- [107] Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, Yearbook of current production statistics paper, printing, plastic products and rubber products, 2017,
- [108] Hitachi, Ltd. Capacity of wind turbine (in Japanese), 2021, [http://www.hitachi.co.jp/products/energy/wind/products/htw2100\\_80a/specification/index.html](http://www.hitachi.co.jp/products/energy/wind/products/htw2100_80a/specification/index.html)
- [109] P. Nguyen-Duy, E.A. Dancy, Calorimetric determination of the thermodynamic properties of the alkali metal salts  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  and their binary eutectic solutions, Thermochimica Acta, 39 (1980) 95-102
- [110] F. Zaversky, J. García-Barberena, M. Sánchez, D. Astrain, Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for CSP performance simulations, Solar Energy, 93 (2013) 294-311
- [111] Concrete Medical Center. List of density data (in Japanese), 2021, <https://concrete-mc.jp/tani-ichiran/>
- [112] The Japan Society of Mechanical Engineers, JSME textbook series heat transfer (in Japanese), The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, 2013
- [113] The Society of Chemical Engineers, Japan, Handbook of Chemical engineering seventh edition (in Japanese), Maruzen Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2011

- [114] Ministry of Economy, Trade and Industry. YEARBOOK OF CURRENT PRODUCTION STATISTICS Paper, Printing, Plastics Products and Rubber Products Statistics, 2021, [https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08\\_seidou.html#menu9](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html#menu9)
- [115] Ministry of the Environment, Study on Basic Zoning Information Concerning Renewable Energies (FY 2013), 2014,
- [116] Japan Meteorological Agency. Meteorological data (in Japanese), 2021, <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- [117] National Institute for Land and Infrastructure Management, Development of urban system technology to achieve a low-carbon society based on hydrogen energy system, 2014,
- [118] 国土交通省. 国土数値情報ダウンロード, 2021, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- [119] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 日射に関するデータベース, 2021, <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>
- [120] Japan Environmental Management Association for Industry, Inventory Database for environmental analysis version 2.3, 2019,
- [121] Life Cycle Assessment Society of Japan, JLCA-LCA database 2020Fy 1st edition, 2020,
- [122] Oji Paper Co., Ltd., Tomioka Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 664-669
- [123] Ministry of the Environment, Entrusted Work Concerning the Development and Disclosure of Basic Zoning Information Concerning Renewable Energies (FY 2019), 2020,
- [124] K. Oosawa, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, Forestry and Wood Industry, in: Y. Kato, M. Koyama, Y. Fukushima, T. Nakagaki (Eds.) Energy Technology Roadmaps of Japan; Future Energy Systems Based on Feasible Technologies Beyond 2030 2016, pp. 391-404
- [125] Oji F-Tex Paper Co., Ltd., Ebetsu Mill, Oji F-Tex Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 1037-1042
- [126] Oji Paper Co., Ltd., Tomakomai Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 805-810
- [127] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Yufutsu Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 63 (2009) 1374-1378
- [128] Oji Materia Co., Ltd., Kushiro Mill, Oji Materia Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 72 (2018) 958-961
- [129] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Kushiro Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 64 (2010) 1439-1444
- [130] Oji Materia Co., Ltd., Nayoro Mill, Oji Materia Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 68 (2014) 679-684
- [131] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Hokkaido Mill-Asahikawa, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 66 (2012) 772-778

- [132] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Hokkaido Mill-Shiraoi, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 294-299
- [133] Mitsubishi Paper Mills Limited, Hachinohe Mill, Mitsubishi Paper Mills Limited (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 72 (2018) 207-215
- [134] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Ishinomaki Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 63 (2009) 592-598
- [135] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Iwanuma Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 63 (2009) 971-977
- [136] Daishowa Paperboard Co., Ltd, Akita Mill, Nippon Daishowa Paperboard Co., Ltd (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 64 (2010) 969-973
- [137] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Nakoso Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 66 (2012) 1144-1148
- [138] Hokuetsu Kishu Paper Co., Ltd., Nagaoka Mill, Nagaoka Specialty Paper Div., Hokuetsu Kishu Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 402-405
- [139] Oji Materia Co., Ltd., Nikko Mill, Oji Materia Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 68 (2014) 1430-1434
- [140] Rengo Co., Ltd., Tonegawa Division Paper Board Mill, Rengo Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 1192-1196
- [141] Oji Paperboard Co., Ltd., Fuji Mill, Oji Paperboard Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 66 (2012) 1017-1022
- [142] Nippon Paper Papyrus Co., Ltd., Harada Mill, NIPPON PAPER PAPER CO., LTD. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 944-948
- [143] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Fuji Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 69 (2015) 1370-1378
- [144] Koa Kogyo Co. Ltd, KOA KOGYO CO. LTD (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 68 (2014) 205-212
- [145] Shin Tokai Paper Co., Ltd., Shimada Mill, Shin Tokai Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 72 (2018) 793-797
- [146] Chuetsu Pulp & Paper Co., Ltd., Takaoka Mill, Chuetsu Pulp & Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 929-935
- [147] Daio Paper Corporation, Kani Mill, Daio Paper Corporation (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 68 (2014) 574-579
- [148] Oji Materia Co., Ltd., Sobue Mill, Oji Materia Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 69 (2015) 438-442
- [149] Mitsubishi Paper Mills Limited, Takasago Mill, Mitsubishi Paper Mills Limited (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 66 (2012) 887-894

- [150] Oji Paper Co., Ltd., Yonago Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 71 (2017) 1215-1223
- [151] Oji Paper Co., Ltd., Kure Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 506-510
- [152] Daishowa Paperboard Co., Ltd, Otake Mill, Nippon Daishowa Paperboard Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 64 (2010) 448-453
- [153] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Iwakuni Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 72 (2018) 440-447
- [154] Daio Paper Corporation, Mishima Mill, Daio Paper Corporation (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 64 (2010) 1316-1320
- [155] Marusumi Paper Co., Ltd., Ohe Mill, Marusumi Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 560-566
- [156] Marusumi Paper Co., Ltd., Kawano Mill, Marusumi Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 64 (2010) 713-717
- [157] Oji Materia Co., Ltd., Saga Mill, Oji Materia Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 67 (2013) 1446-1450
- [158] Oji Paperboard Co., Ltd., Oita Mill, Oji Paperboard Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 66 (2012) 542-547
- [159] Nippon Paper Industries Co., Ltd., Yatsushiro Mill, Nippon Paper Industries Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 71 (2017) 1042-1049
- [160] Oji Paper Co., Ltd., Nichinan Mill, Oji Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 172-177
- [161] Chuetsu Pulp & Paper Co., Ltd., Sendai Mill, Chuetsu Pulp & Paper Co., Ltd. (in Japanese), JAPAN TAPPI JOURNAL, 65 (2011) 1330-1335
- [162] N. Sako, M. Koyama, T. Okubo, Y. Kikuchi, Techno-economic and life cycle analyses of battery-assisted hydrogen production systems from photovoltaic power, Journal of Cleaner Production, 298 (2021)
- [163] 独. 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 水素エネルギー白書ーイチから知る水素社会ー, 2015,
- [164] L. Zhao, F. Li, Z. Li, L. Zhang, G. He, Q. Zhao, J. Yuan, J. Di, C. Zhou, Thermodynamic analysis of the emptying process of compressed hydrogen tanks, International Journal of Hydrogen Energy, 44 (2019) 3993-4005
- [165] J. Sakamoto, J. Nakayama, T. Nakarai, N. Kasai, T. Shibutani, A. Miyake, Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station, International Journal of Hydrogen Energy, 41 (2016) 2096-2104



- [166] トヨタ自動車株式会社. 文部科学省委託事業『次世代自動車エキスパート要請教育プログラム開発事業』 実証実験授業口座名一次世代自動車エキスパート FCV 編—『トヨタ MIRAI の構造及び整備技術』, 2016, <http://jisedai-jidosha.com/images/2contents/07/hyougo08.9.pdf>
- [167] エアウォーター, 産業ガス関連事業 水素 (H<sub>2</sub>) , (2021)

## 論文業績

---

自身を著者に含む投稿論文および査読中の投稿済み論文のうち、この博士論文に内容の一部が含まれるものを以下に記す（自身は太字下線で表示）。本文中では記号[i]、[ii]を用いて引用した。

- i. **A. Yamaki**, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, Lifecycle greenhouse gas emissions of thermal energy storage implemented in a paper mill for wind energy utilization, *Energy*, 205 (2020) 118056
- ii. **A. Yamaki**, S. Fujii, Y. Kanematsu, Y. Kikuchi, Life cycle greenhouse gas emissions of cogeneration energy hubs at Japanese paper mills with thermal energy storage, *Energy*, under revision

# NOMENCLATURE

---

## *Abbreviations*

AD	air dry
ARD	abiotic resource depletion
BD	bone dry
BKP	bleached kraft pulp
BOD	biochemical oxygen demand
CAES	compressed air energy storage
CCS	carbon capture and storage
CCU	carbon capture and utilization
CHP	combined heat and power
CO <sub>2</sub>	carbon dioxide
COD	chemical oxygen demand
COP	coefficient of performance
C-PMES	conventional paper mill energy system
CPP	coated printing paper
CSP	concentrated solar power
DIP	deinked pulp
DIP-PP	DIP for printing paper
DIP-NP	DIP for newsprint paper

DIP-Bf	DIP for the front of the board
DIP-Bib	DIP for the inside and back of the board
DIP-SP	DIP for sanitary paper
DR	demand response
GHG	greenhouse gas
HP	high pressure
LCA	life-cycle assessment
LC-GHG	life-cycle greenhouse gas emissions
LNGCC	liquefied natural gas combined cycle
LP	low pressure
MCFC	molten carbonate fuel cell
MCH	methylcyclohexane
NP	Newsprint paper in rolls
PAFC	phosphoric acid fuel cell
PEFC	polymer electrolyte fuel cell
PMP	paper milling process
PoC	proof of concept
POME	palm oil mill effluent
PSH	pumped storage hydropower
PV	photovoltaics
RPF	refused plastic-paper fuels
SOFC	solid oxide fuel cell
SP	sanitary paper

TES	thermal energy system
TMP	thermomechanical pulp
T-PMES	TES-installed paper mill energy system
UPP	uncoated printing paper
VRE	variable renewable energy
WB	white board
WDF	waste-derived fuel
WEC <sub>th</sub>	wind–thermal energy converter
WT <sub>th</sub> -ES	wind-powered thermal energy system

### *Symbols*

$A_j$	area of heat utilization facility of $j$ [m <sup>2</sup> ]
$b$	intercept of enthalpy of molten salt [-]
$c_j^{\text{HD}}(T)$	heat demand per unit area from heat utilization facility $j$ at temperature $T$ [J <sub>th</sub> /m <sup>2</sup> /h]
$C_p$	specific heat of molten salt [J/kg K]
$e^{\text{TES}}$	TES utilization efficiency [-]
$E^{\text{grid}}$	amount of power selling to the power grid for a year [J <sub>e</sub> /y]
$\dot{E}^{\text{grid}}(t)$	amount of power selling to the power grid at time $t$ [J <sub>e</sub> /h]
$E_{\text{const}}^{\text{grid}}$	amount of power selling to the power grid when selling a constant power [J <sub>e</sub> /h]
$\dot{E}^{\text{paper}}(t)$	power demand in a paper mill at time $t$ [J <sub>e</sub> /h]
$\dot{E}^{\text{PV}}(t)$	power generation by PV at time $t$ [J <sub>e</sub> /h]
$h(T)$	enthalpy of molten salt at temperature $T$ [J <sub>th</sub> /kg-molten salt]

$M^{\text{TES}}$	amount of molten salt [t]
$M_{\text{cold\_min}}^{\text{TES}}$	minimum amount of molten salt in cold tank [t]
$M_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$	amount of molten salt in cold tank at time $t$ [t]
$M_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$	amount of molten salt in hot tank at time $t$ [t]
$\dot{M}_{\text{CtoH}}^{\text{TES}}(t)$	amount of molten salt transferred from cold tank to hot tank between time $t - \Delta t$ and $t$ [t]
$\dot{M}_{\text{HtoC}}^{\text{TES}}(t)$	amount of molten salt transferred from hot tank to cold tank between time $t - \Delta t$ and $t$ [t]
$p_i^{\text{elec}}$	power intensity of production $i$ [J <sub>e</sub> /t-product]
$p_{i,p}^{\text{steam}}$	steam intensity with pressure $p$ of production $i$ at time $t$ [J <sub>th</sub> /t-product]
$\dot{P}_i(t)$	rate of paper production $i$ at time $t$ [t/h]
$q_p^{\text{drain}}$	recovery efficiency of drain with steam pressure $p$ [J <sub>th</sub> /J <sub>th</sub> -steam]
$\dot{Q}^{\text{con}}(t)$	thermal energy of condensate at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}^{\text{dem}}(t)$	demand of thermal energy at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}^{\text{drain}}(t)$	thermal energy of drain at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}_p^{\text{e-turbine}}(t)$	amount of extracted or exhausted steam for turbine with pressure $p$ at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using all fuel at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}_{\text{BL}}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using black liquor at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}_{\text{coal}}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using coal at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}_{\text{HO}}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using heavy oil at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]
$\dot{Q}_{\text{NG}}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using natural gas at time $t$ [J <sub>th</sub> /h]

$\dot{Q}_{\text{WDF}}^{\text{fuel}}(t)$	thermal energy from boiler or heating furnace using waste-derived fuel at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}^{\text{HD}}(t)$	thermal energy of heat demand at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}_{\text{cold}}^{\text{leakage}}(t)$	heat release from cold tank at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}_{\text{hot}}^{\text{leakage}}(t)$	heat release from hot tank at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}_p^{\text{m-turbine}}(t)$	amount of main steam for turbine with pressure $p$ at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}^{\text{sup}}(t)$	supply of thermal energy from TES at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}_p^{\text{steam}}(t)$	amount of steam with pressure $p$ at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$Q_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$	stored heat in cold tank at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}$ ]
$Q_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$	stored heat in hot tank at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}$ ]
$Q_{\text{max}}^{\text{TES}}(t)$	maximum thermal energy additionally stored to TES media between time $t - \Delta t$ and $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}$ ]
$Q^{\text{vicinity}}$	amount of heat selling to the vicinity for a year [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{y}$ ]
$\dot{Q}^{\text{vicinity}}(t)$	amount of heat selling to the vicinity at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$\dot{Q}_{\text{WEC}_{\text{Th}}}^{\text{wind}}(t)$	thermal energy from $\text{WEC}_{\text{th}}$ at time $t$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{h}$ ]
$r_j^{\text{HD}}(t)$	ratio of heat demand at time $t$ to maximum heat demand in a day [%]
$r^{\text{vicinity}}$	ratio of heat selling to heat demand [%]
$t^{\text{con}}$	recovery efficiency of condensate with steam pressure $p$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{J}_{\text{th-steam}}$ ]
$t_{l.p.}^{\text{ex}}$	steam intensity of a turbine for extracted or exhausted steam with pressure $l.p.$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{J}_e$ ]
$t_{h.p.}^{\text{main}}$	steam intensity of a turbine for main steam with pressure $h.p.$ [ $\text{J}_{\text{th}}/\text{J}_e$ ]
$T$	temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{amb}}(t)$	ambient temperature at time $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{\text{cold}}^{\text{TES}}(t)$	temperature of cold tank at time $t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{hot}}^{\text{TES}}(t)$  temperature of hot tank at time  $t$  [°C]

*Subscript*

e electricity

$h.p.$  steam pressure for high-pressure steam [MPa]

$i$  types of production (BKP, TMP, DIP, newsprint paper in rolls, uncoated printing paper, coated printing paper, sanitary paper, white board)

$j$  types of heat utilization facility (office, store, hotel, hospital)

$l.p.$  steam pressure for low-pressure steam [MPa]

$p$  steam pressure [MPa]

th thermal energy



## APPENDIX

Table S 1. 製造業の分類[43]

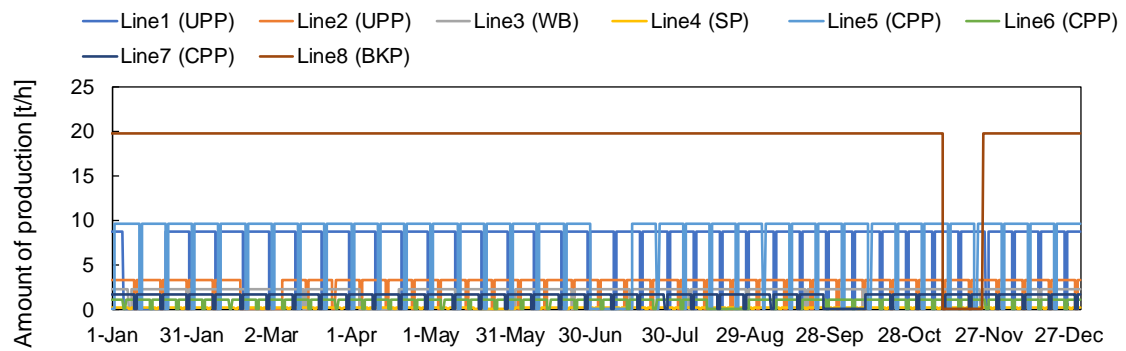
分類名	内容	本研究の 図表にお ける表記
食料品製造業	畜産食料品、水産食料品、野菜缶詰、果実缶詰、農産保存食料品、調味料、糖類、動植物油脂、精穀、製粉及びでんぷん、ふくらし粉、イースト、こうじ、麦芽、パン、菓子、めん類、豆腐、油揚げ、冷凍調理食品、惣菜などの製造	食品飲料
飲料・たばこ・飼料製造業	清涼飲料、酒類、茶、コーヒー、氷、たばこ、飼料、有機質肥料の製造	上と同じ
繊維工業	製糸、紡績糸、織物、ニット生地、網地、フェルト、染色整理及び衣服の縫製など繊維製品の製造	繊維
木材・木製品製造業（家具を除く）	(1) 製材及び単板（ベニヤ）、合板、屋根まさなど木製基礎資材の製造 (2) (1)の木材又は竹、とう、コルクなどを主要材料としてつくられる製品の製造	木製品・家具
家具・装備品製造業	家庭用及び事務用家具（和式及び洋式を含む）、宗教用具、戸、障子、ふすま、日よけ、竹すだれなどの製造	上と同じ
パルプ・紙・紙加工品製造業	(1) 木材、その他の植物原料又は古繊維から、主としてパルプ及び紙の製造 (2) (1)の紙から紙加工品の製造	製紙
印刷・同関連業	印刷業及びこれに関連した補助的業務	印刷
化学工業	主な製造過程となる化学的処理によって得られた物質の混合、最終処理	石油化学
石油製品・石炭製品製造業	石油の精製 購入した原料を混合加工して潤滑油、グリースの製造 コークス炉による石炭の乾留 石炭を主原料とした練炭、豆炭の製造	上と同じ

	舗装材料の製造	
プラスチック製品製造業 (別掲を除く)	プラスチックを用い、押出成形機、射出成形機などの各種成形機(又は成形器)により成形された押出成形品、射出成形品などの成形製品の製造 同製品の切断、接合、塗装、蒸着めっき、バフ加工などの加工 プラスチックを用いた成形のための配合、混和(短繊維、充てん剤、安定剤、着色剤、可塑剤等の混和) 再生プラスチックの製造	プラ・ゴム・皮革
ゴム製品製造業	天然ゴム類、合成ゴムなどから作られたゴム製品(タイヤ、チューブ、ゴム製履物、ゴム引布、ゴムベルト、ゴムホース、工業用ゴム製品、更生タイヤ、再生ゴムなど)の製造	上と同じ
なめし革・同製品・毛皮製造業	なめし革製造業、毛皮製造業及び各種のなめし革製品、再生革製品の製造	上と同じ
窯業・土石製品製造業	板ガラス及びその他のガラス製品、セメント及び同製品、建設用粘土製品、陶磁器、耐火物、炭素及び黒鉛製品、ほうろう鉄器、研磨材料、骨材、石工品、石膏製品、石灰などの製造	窯業・土石
鉄鋼業	鉱石、鉄くずなどから鉄及び鋼の製造 鉄及び鋼の鑄造品、鍛造品、圧延鋼材、表面処理鋼材などの製造	鉄鋼
非鉄金属製造業	鉱石(粗鉱、精鉱)、金属くずなどを処理することによる非鉄金属の製錬及び精製 非鉄金属の合金製造、圧延、抽伸、押出し 非鉄金属の鑄造、鍛造、その他の基礎製品の製造	非鉄
金属製品製造業	ブリキ缶及びその他のめっき板等製品、刃物、手道具類、一般金物類、電熱器を除く加熱装置、建設用・建築用金属製品、金属線製品及び他に分類されない各種の金属製品などの製造	金属
はん用機械器具製造業	はん用的に各種機械に組み込まれ、又は取り付けられる機械器具の製造	機械

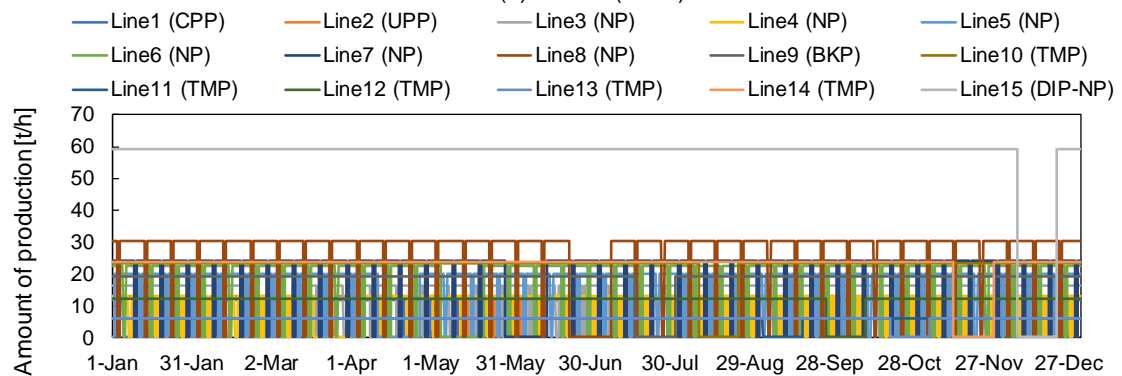
---

生産用機械器具製造業	物の生産に供される機械器具の製造	上と同じ
業務用機械器具製造業	業務用及びサービスの生産に供される機械器具の製造	上と同じ
電子部品・デバイス・電子回路製造業	電気機械器具、情報通信機械器具などに用いられる電子部品、デバイス及び電子回路の製造	上と同じ
電気機械器具製造業	電気エネルギーの発生、貯蔵、送電、変電及び利用を行う機械器具の製造	上と同じ
情報通信機械器具製造業	通信機械器具及び関連機器、映像・音響機械器具、電子計算機及び附属装置の製造	上と同じ
輸送用機械器具製造業	輸送用機械器具の製造	上と同じ
その他の製造業	上記に分類されない、貴金属製品、ボタン、時計、楽器、がん具、運動用具、ペン、鉛筆、絵画用品、漆器、レコード、眼鏡などの製造	その他

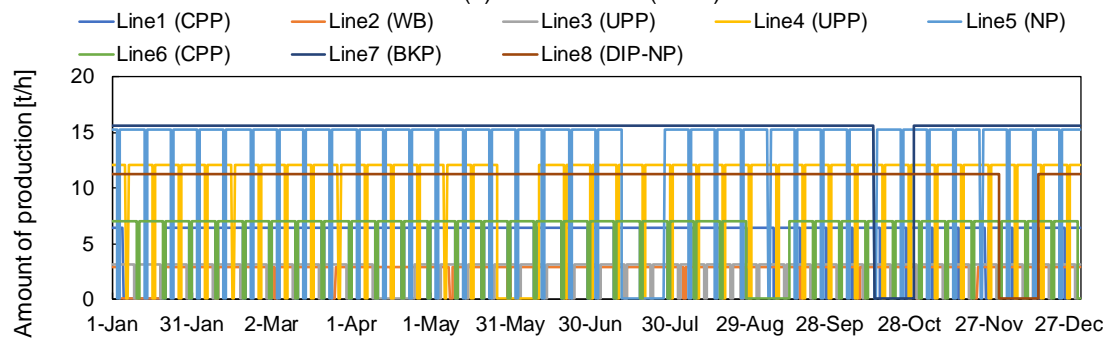
---



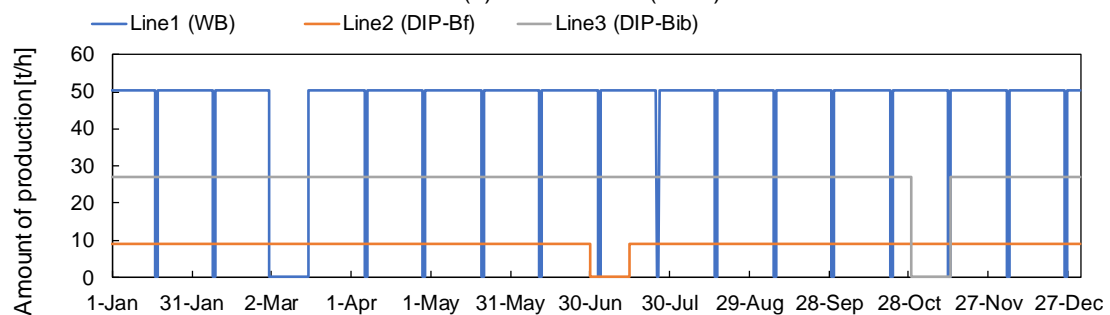
(1) Ebetsu (No. 1).



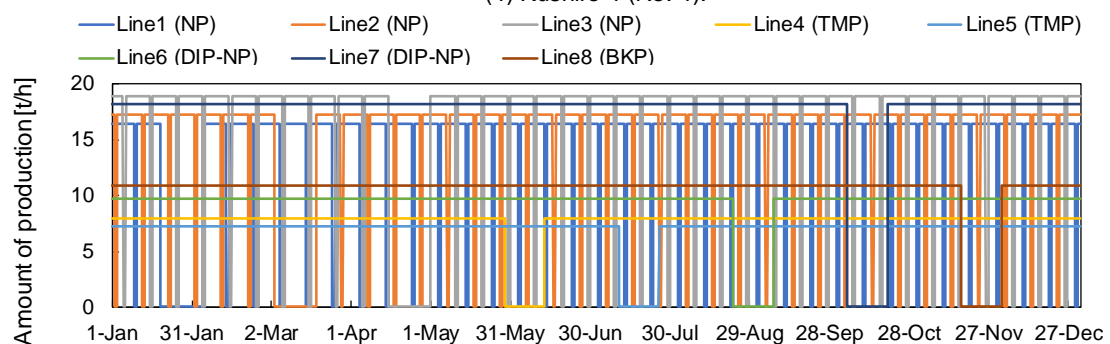
(2) Tomakomai-1 (No. 2).



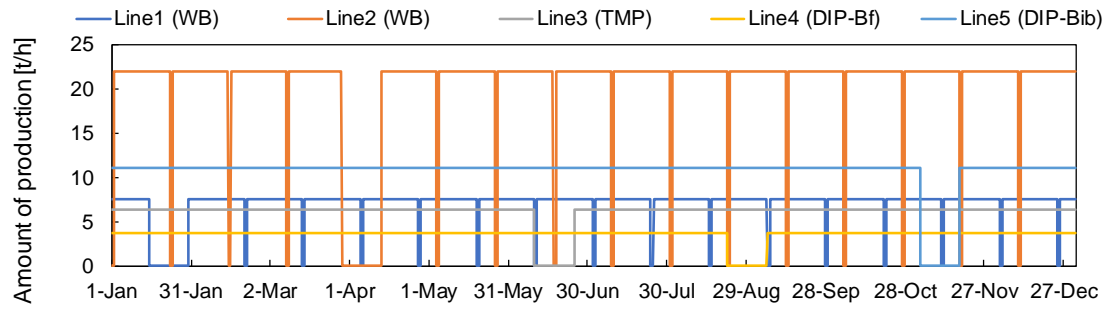
(3) Tomakomai-2 (No. 3).



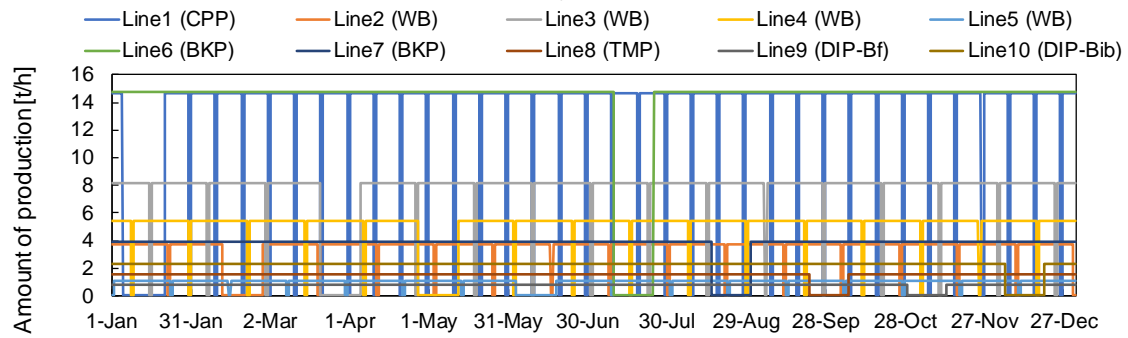
(4) Kushiro-1 (No. 4).



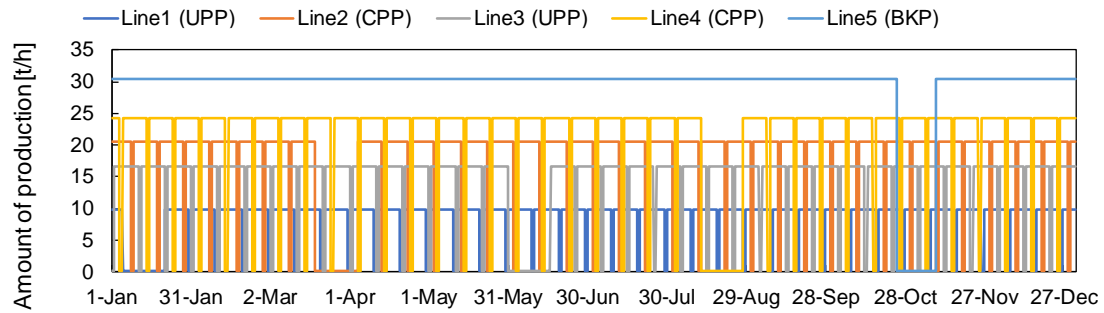
(5) Kushiro-2 (No. 5).



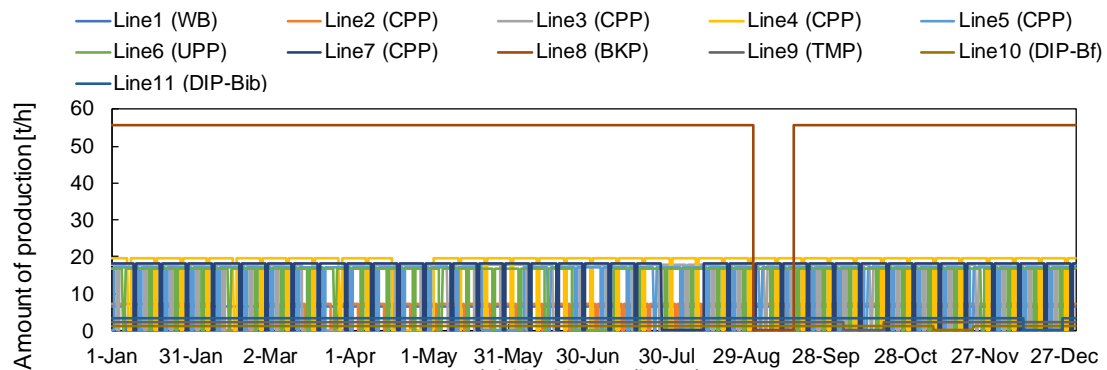
(6) Nayoro (No. 6).



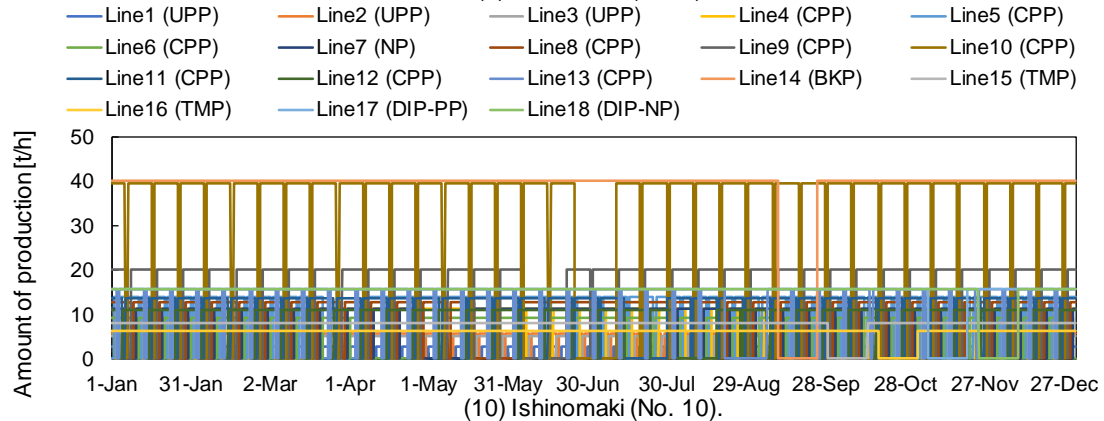
(7) Asahikawa (No. 7).



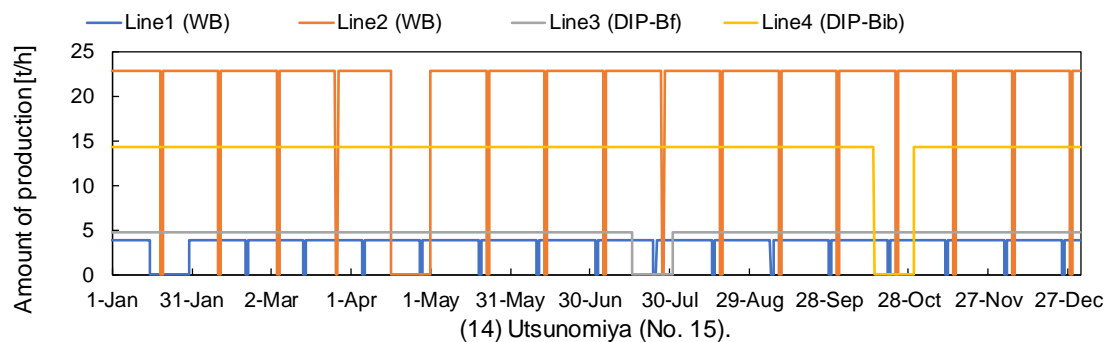
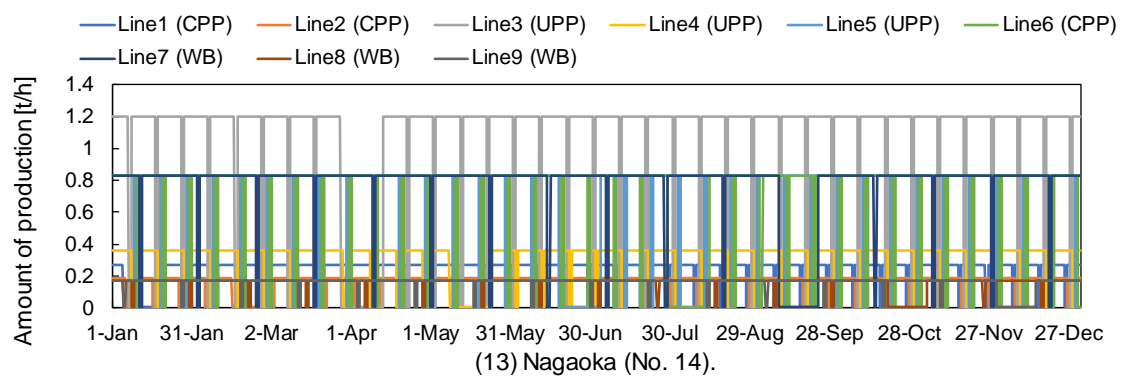
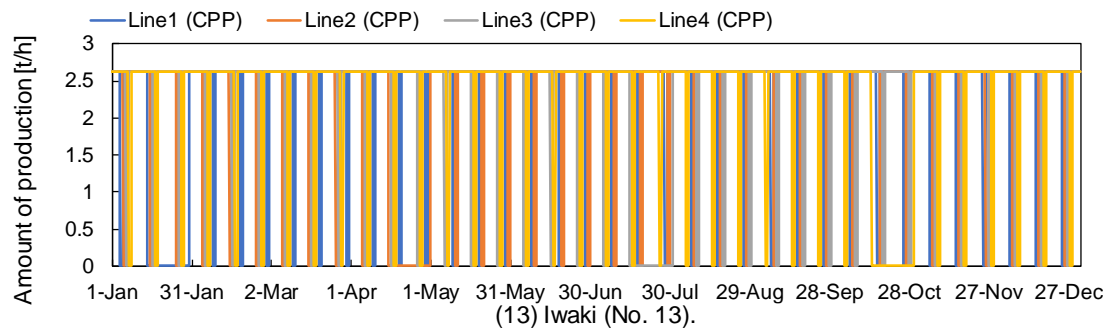
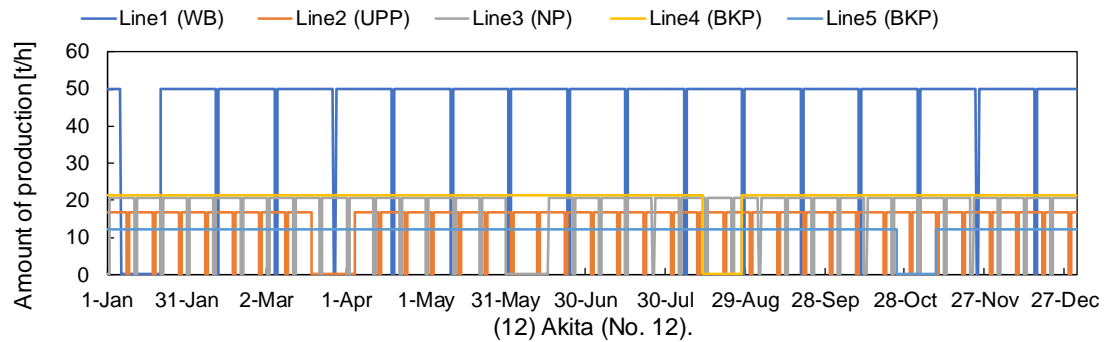
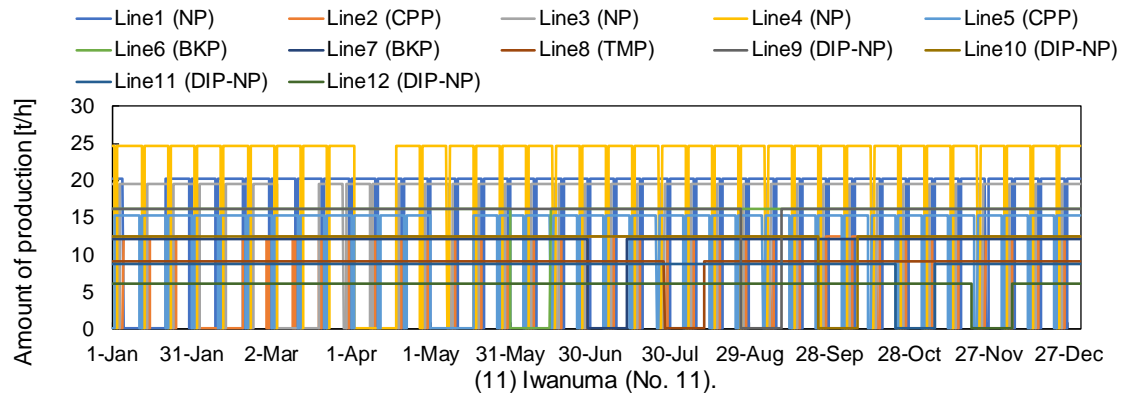
(8) Shiraoi (No. 8).

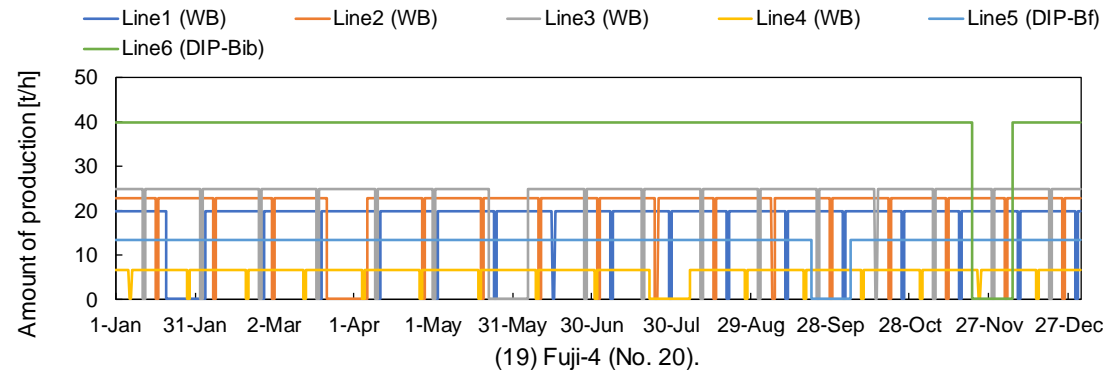
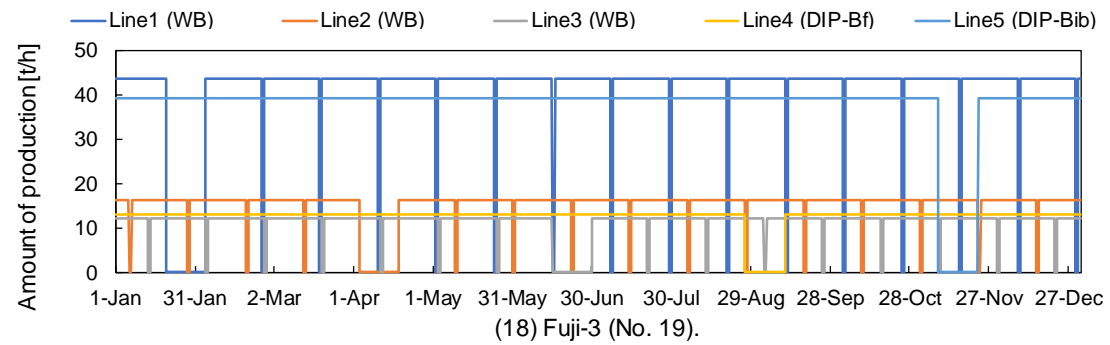
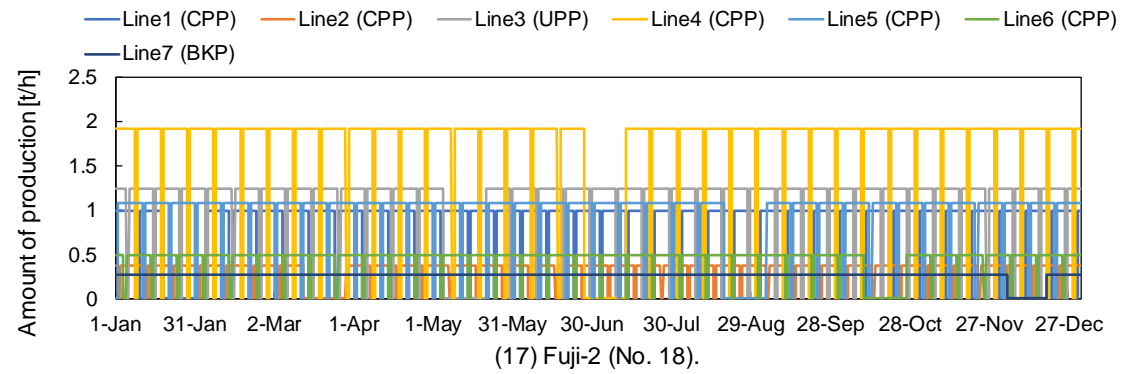
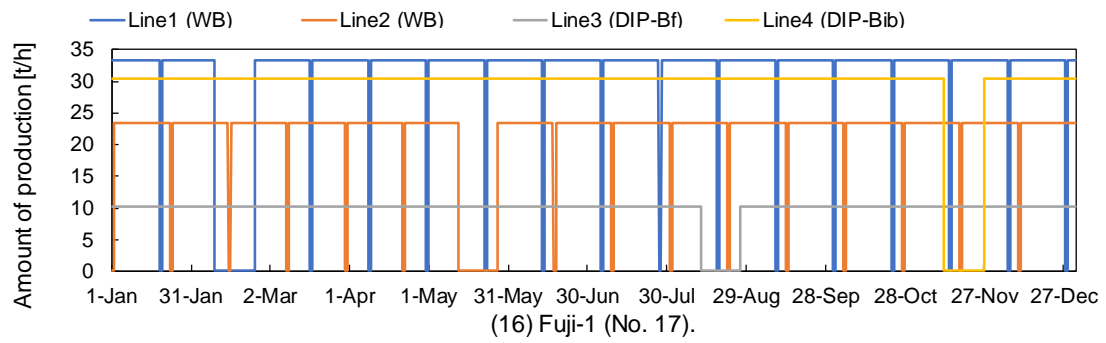
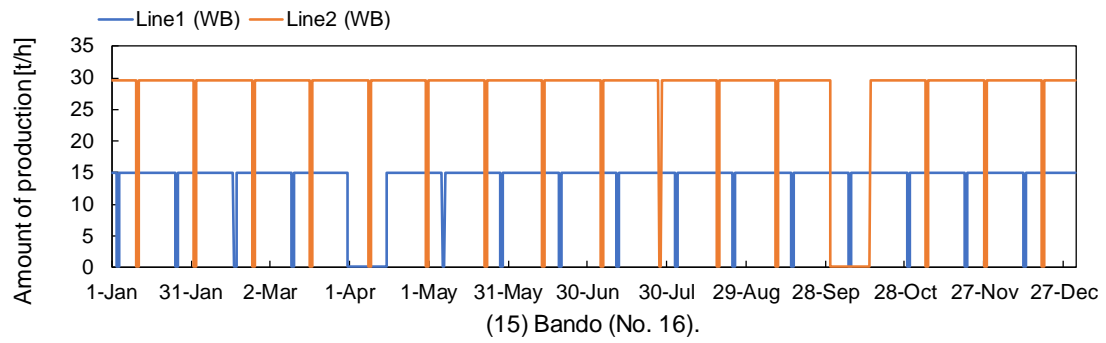


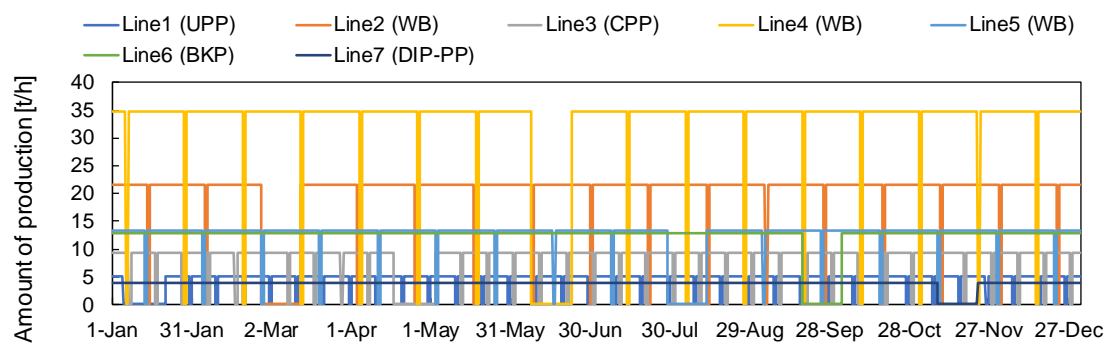
(9) Hachinohe (No. 9).



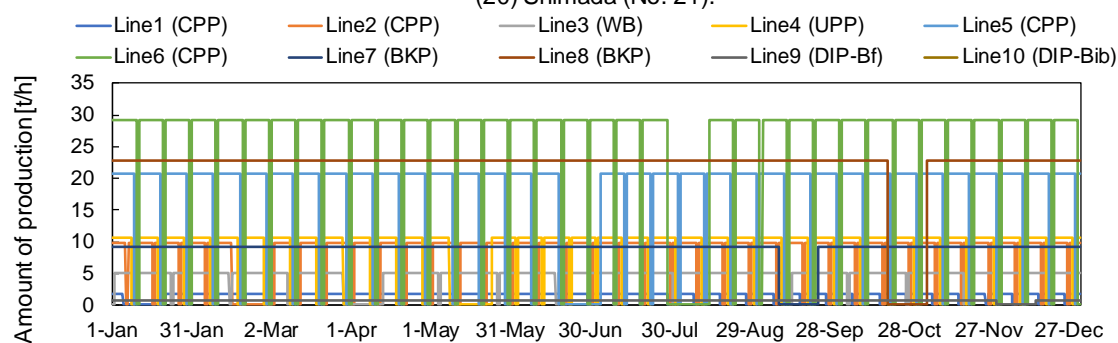
(10) Ishinomaki (No. 10).



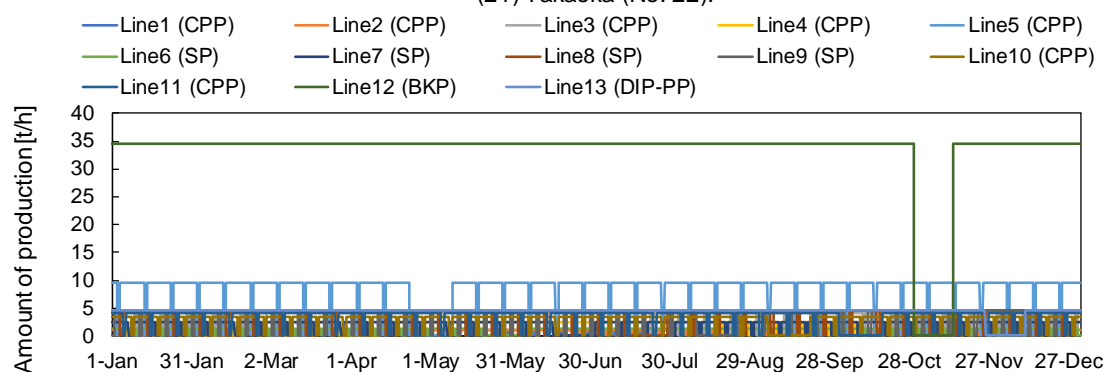




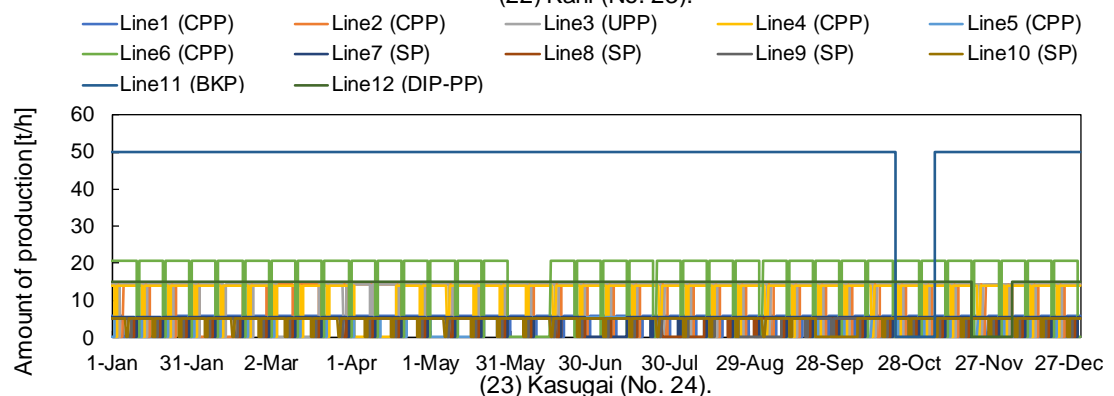
(20) Shimada (No. 21).



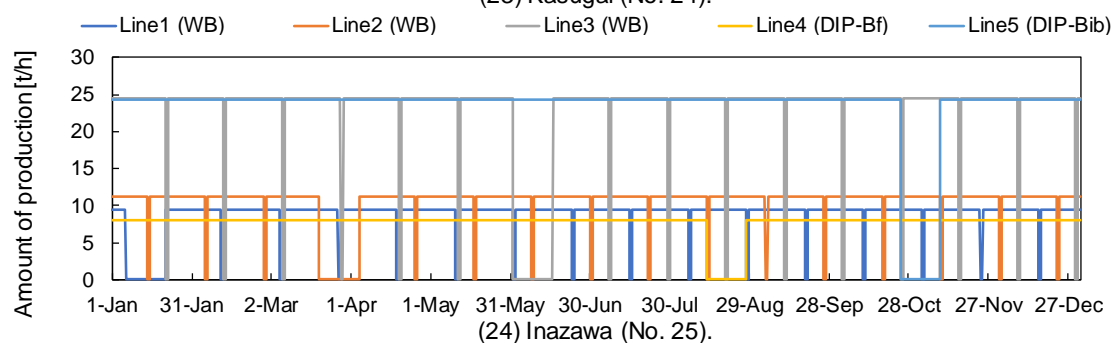
(21) Takaoka (No. 22).



(22) Kani (No. 23).

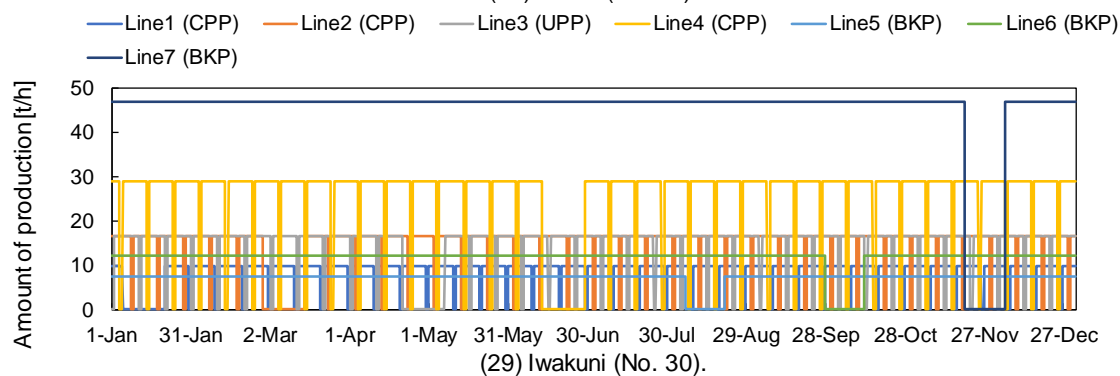
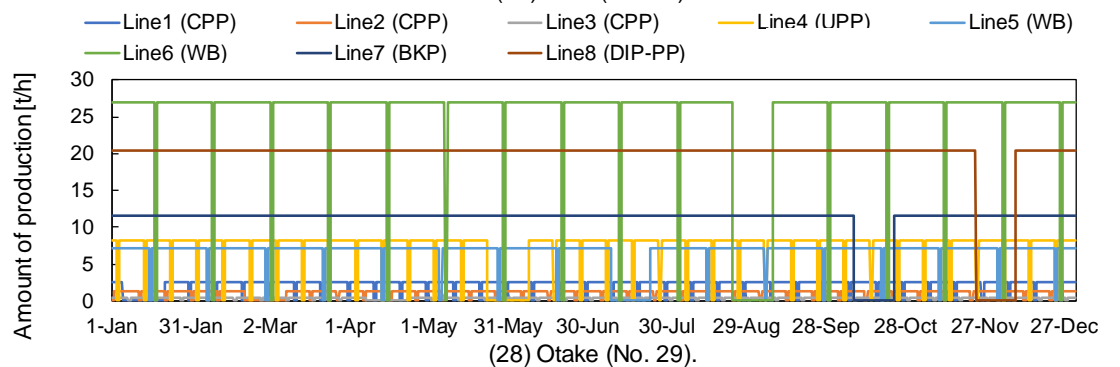
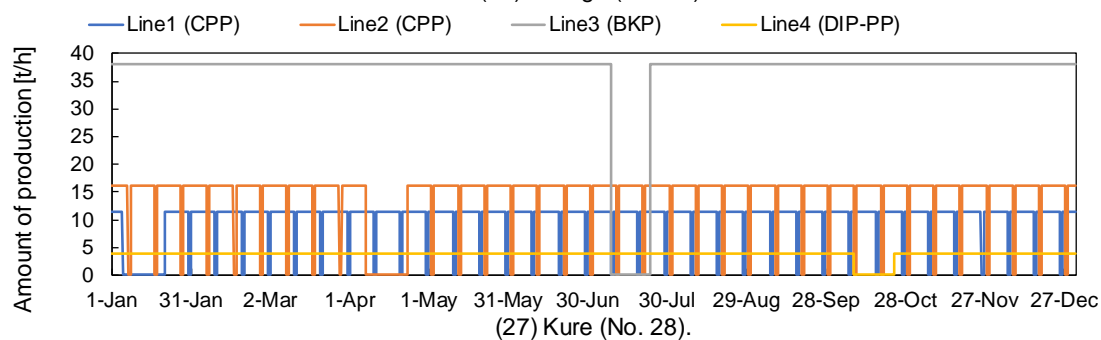
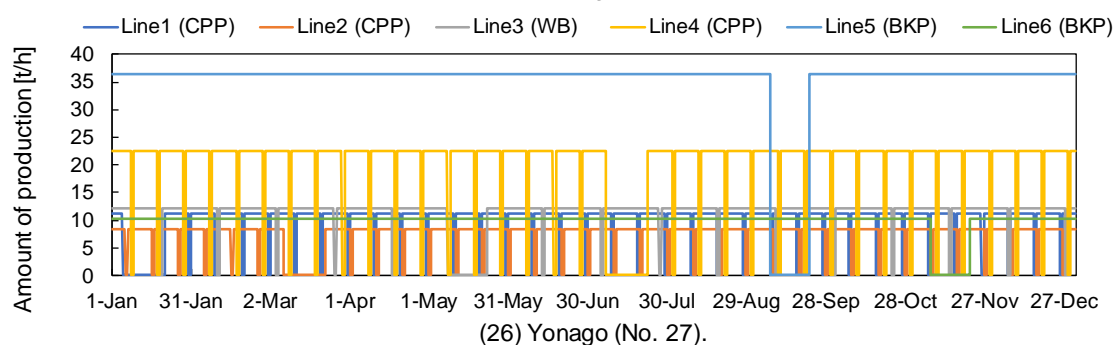
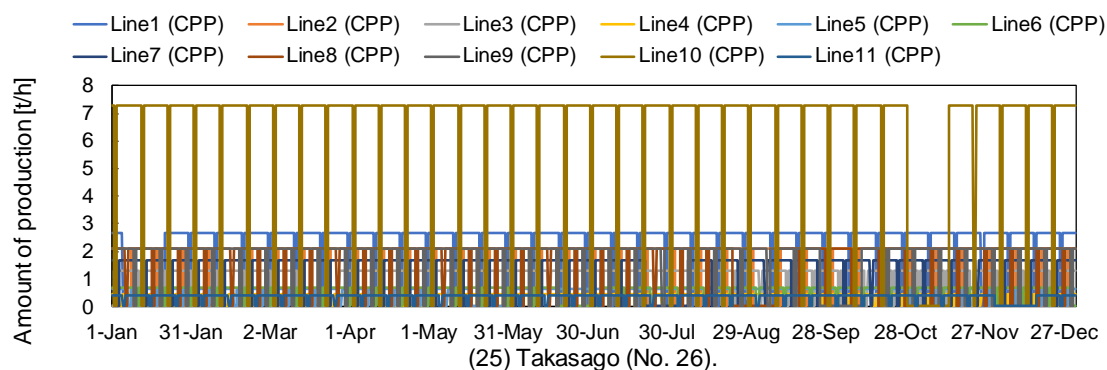


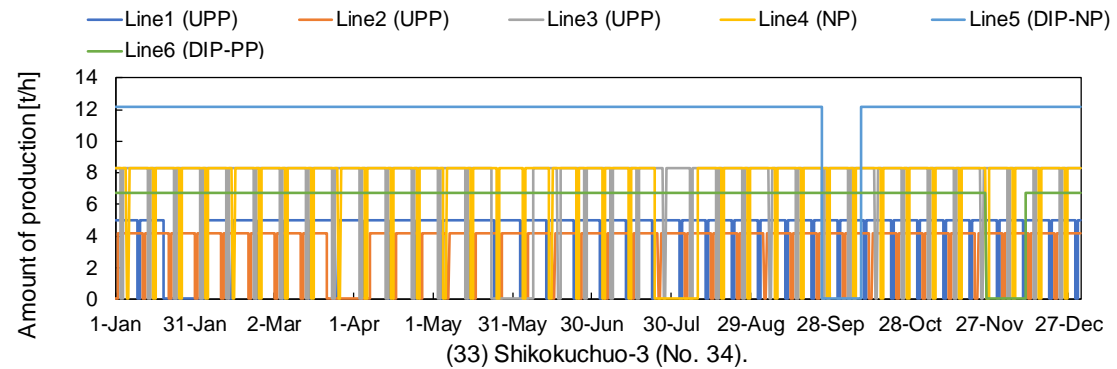
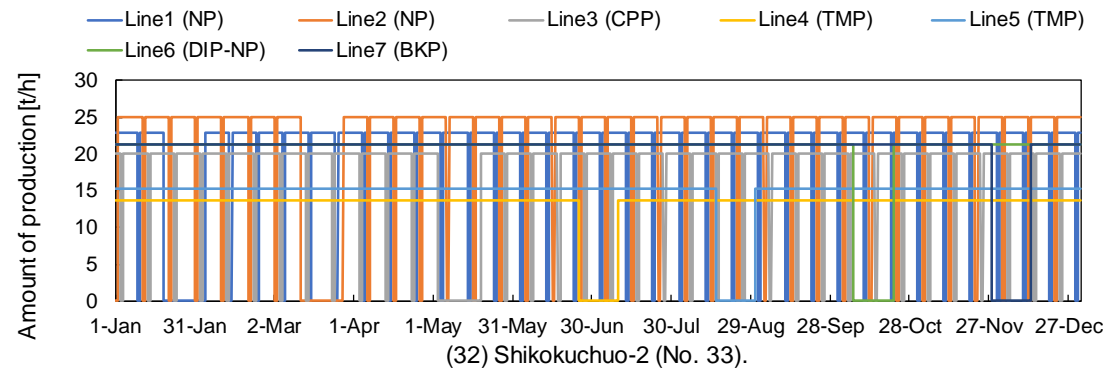
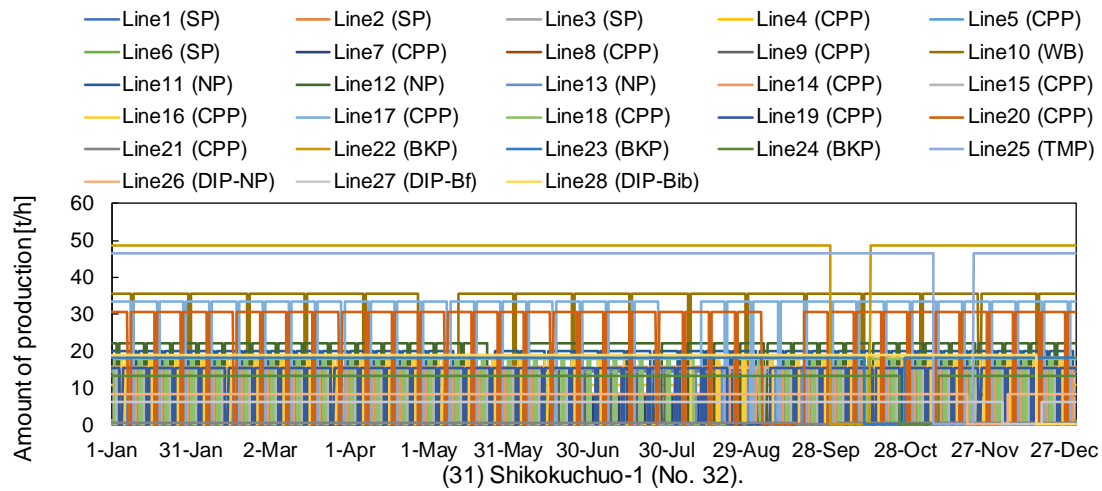
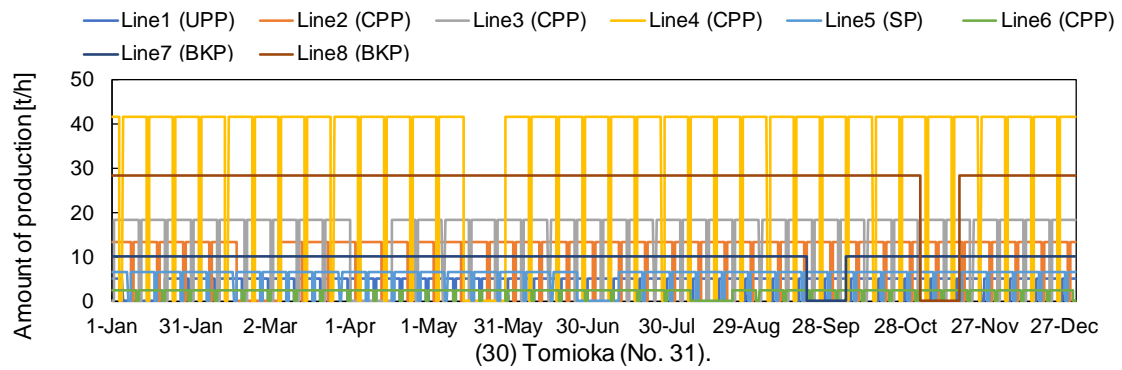
(23) Kasugai (No. 24).



(24) Inazawa (No. 25).







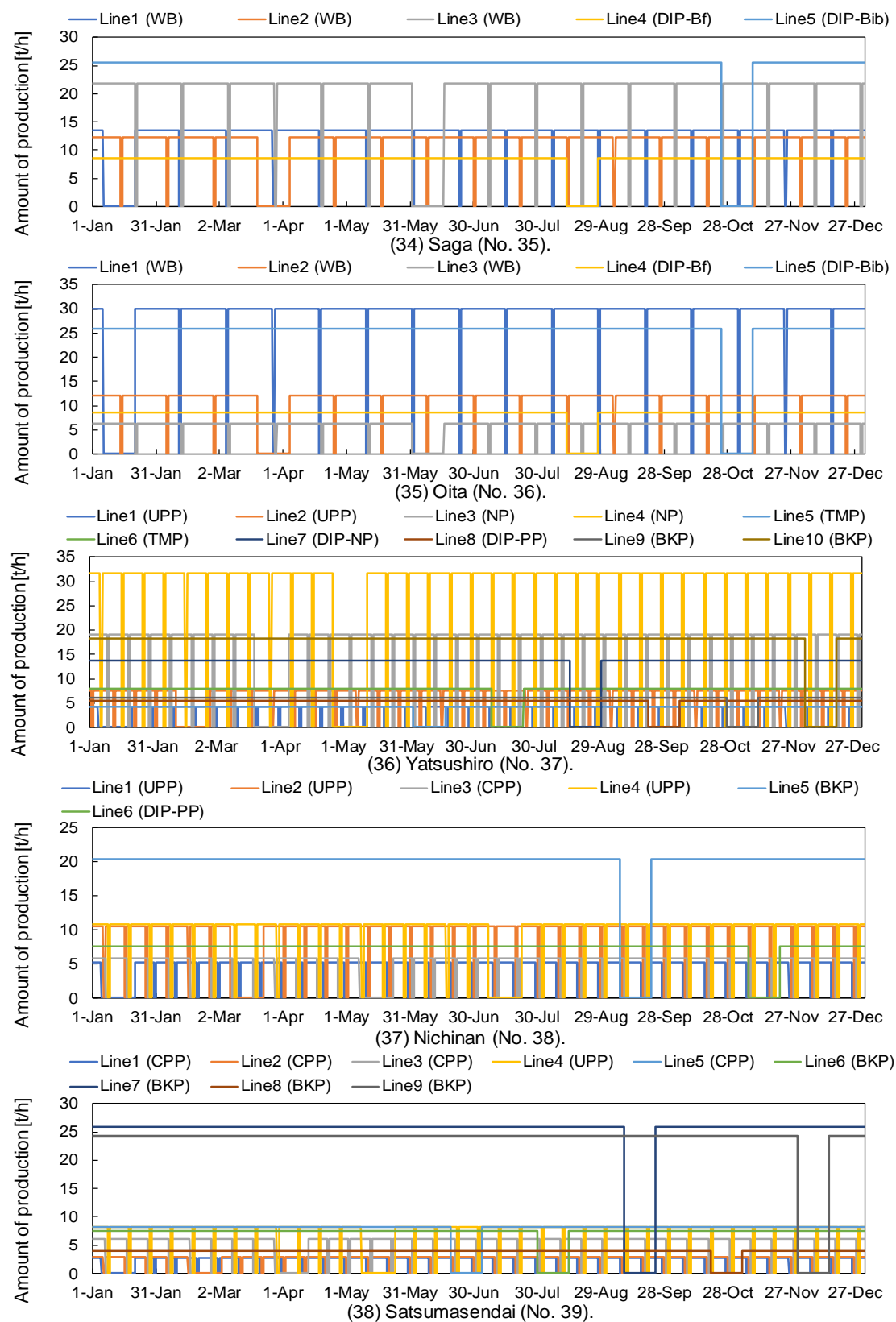
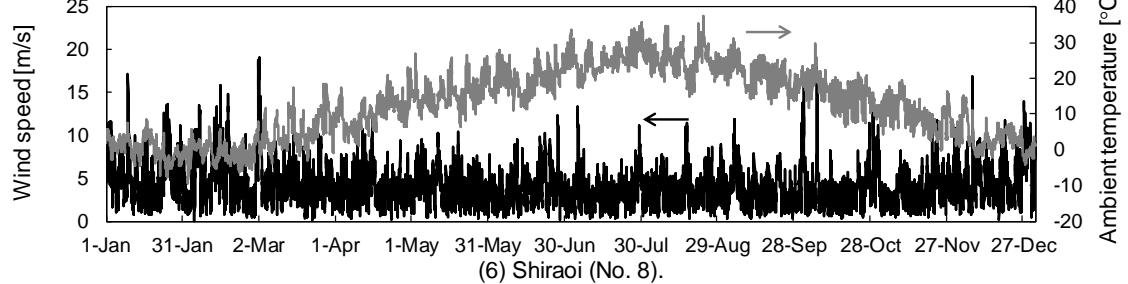
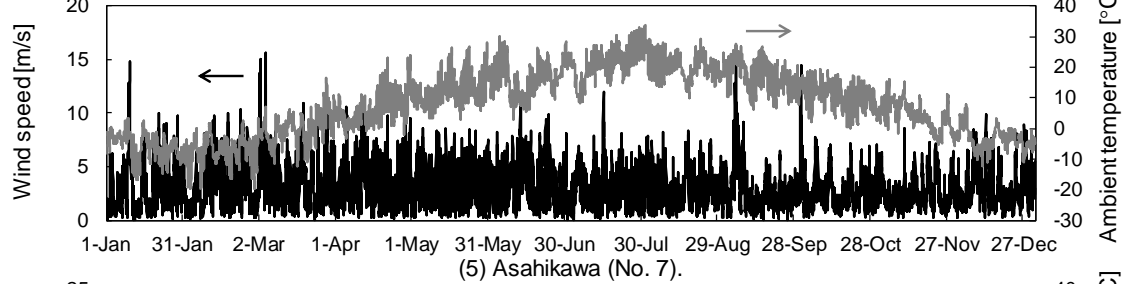
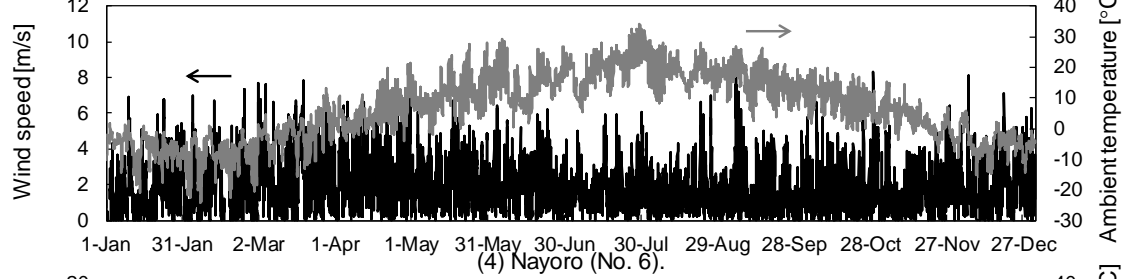
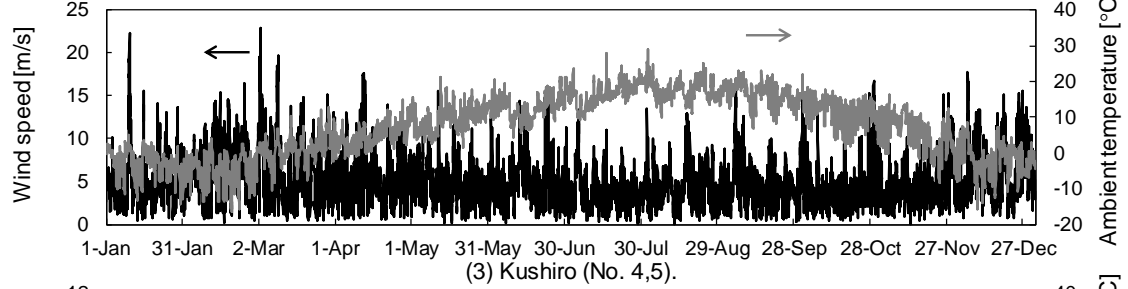
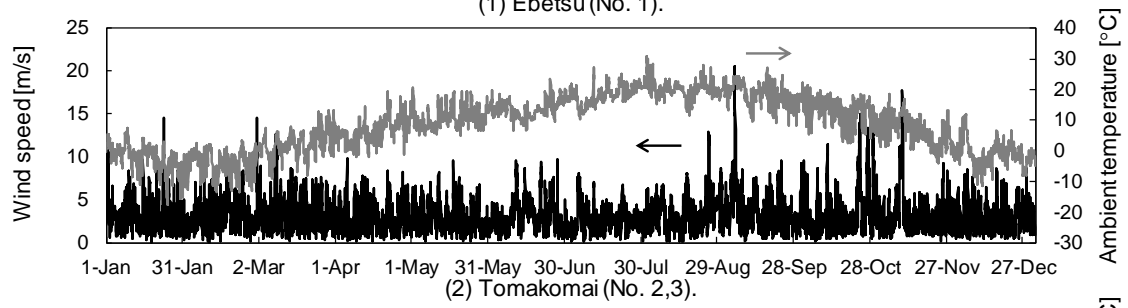
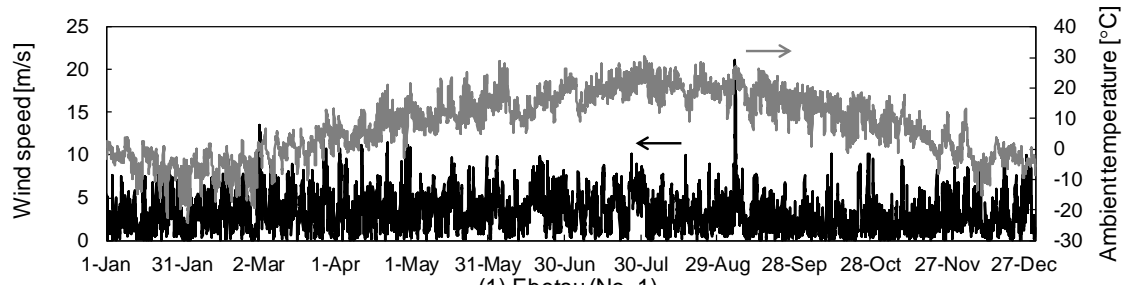
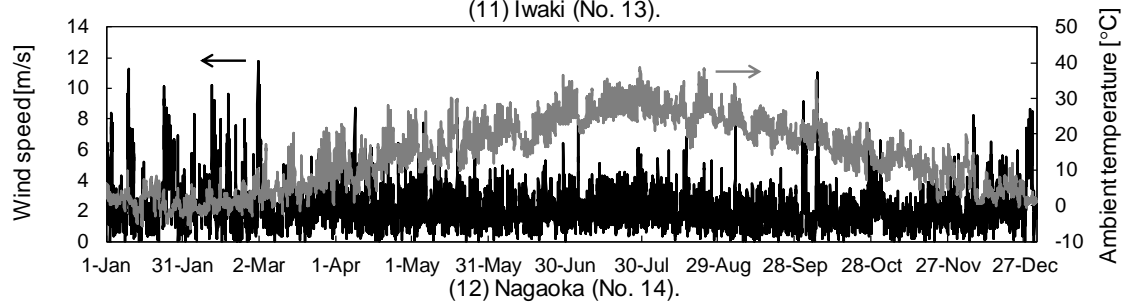
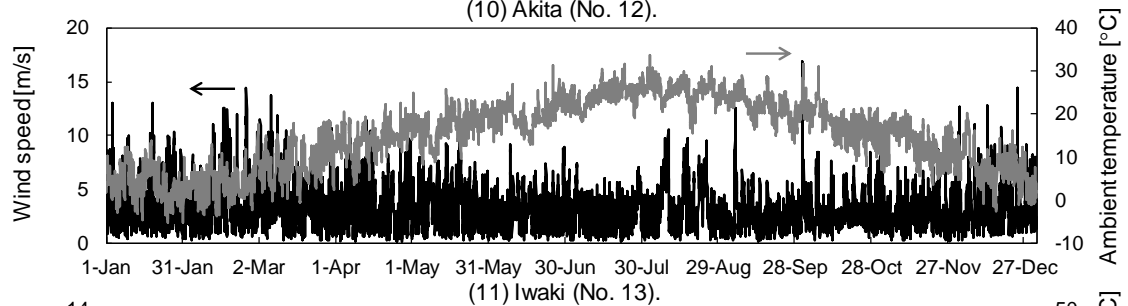
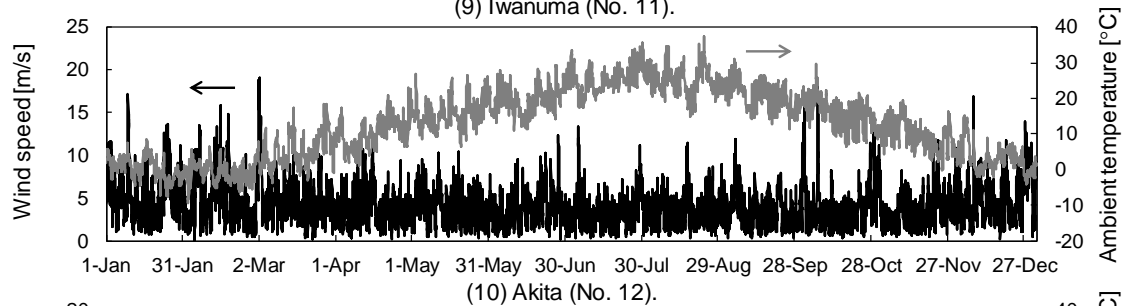
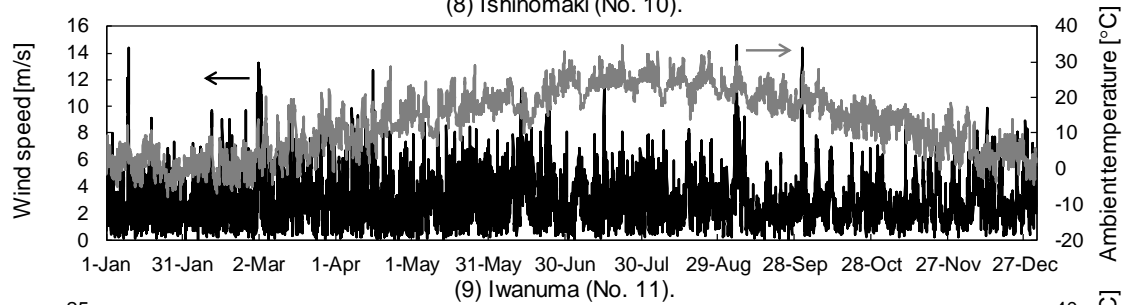
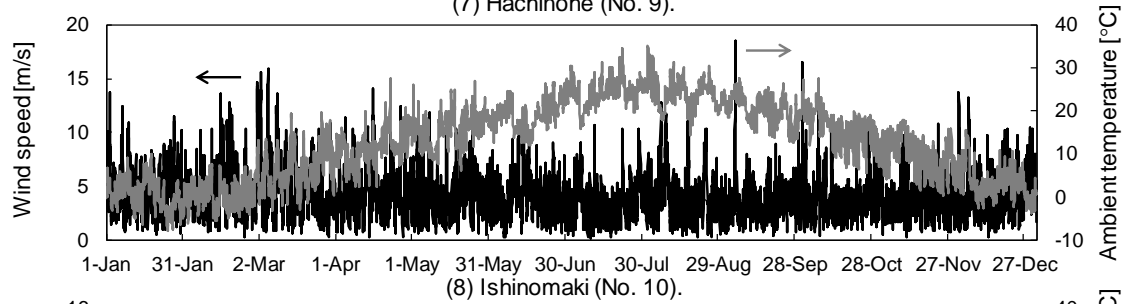
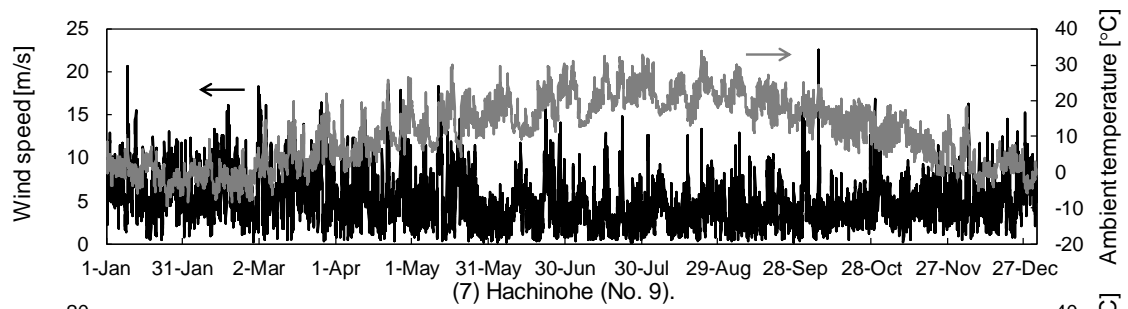
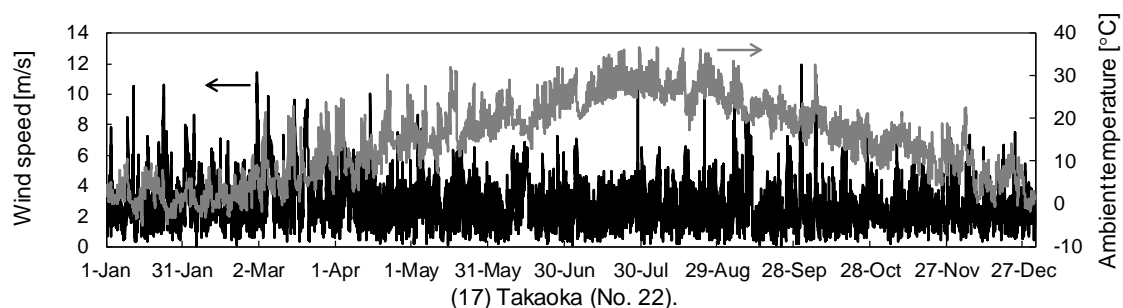
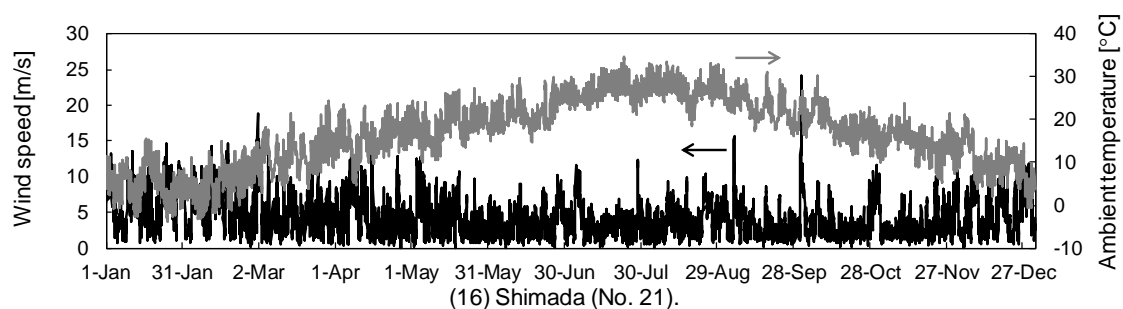
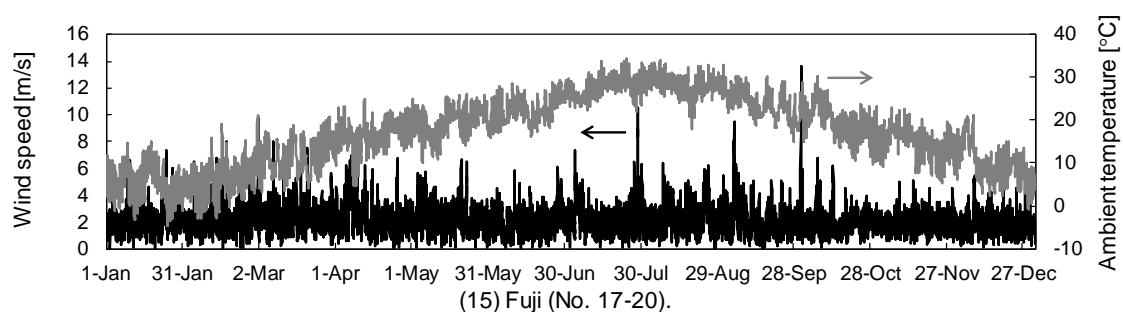
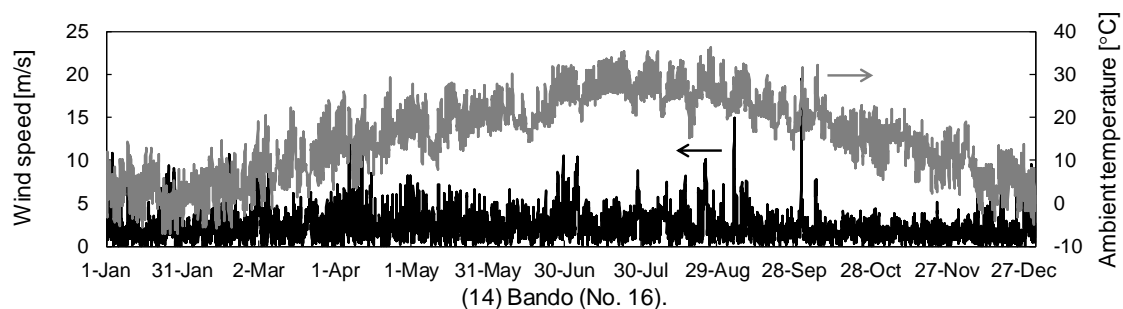
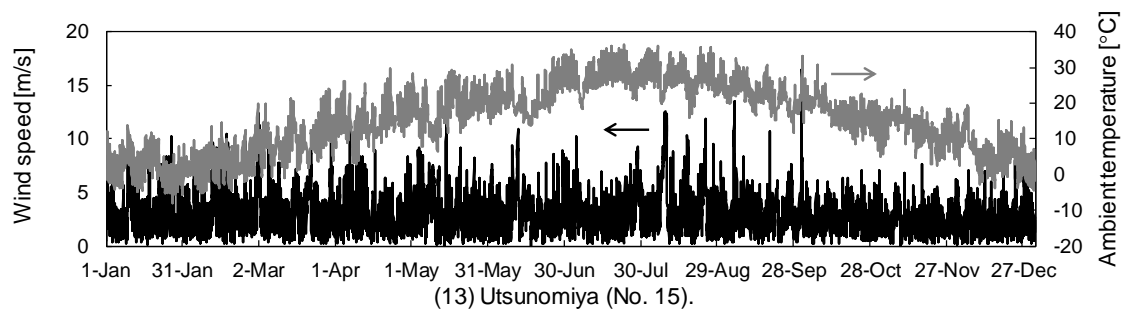
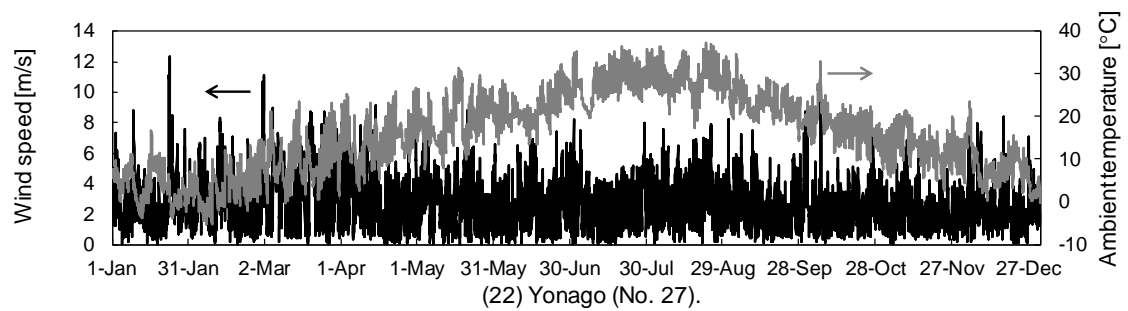
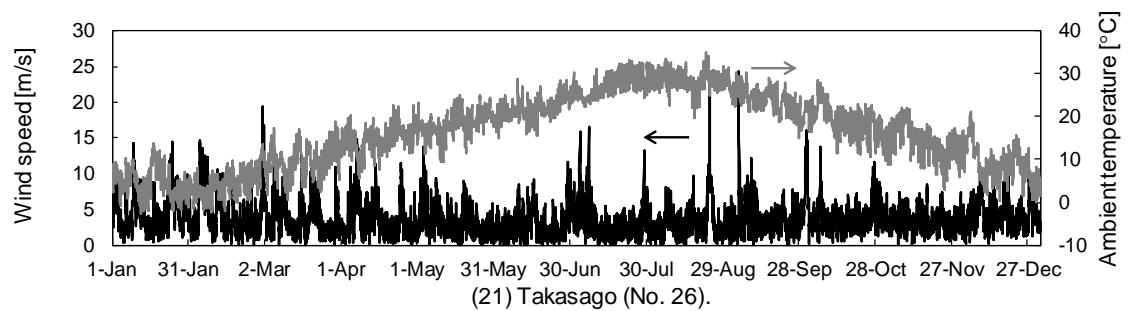
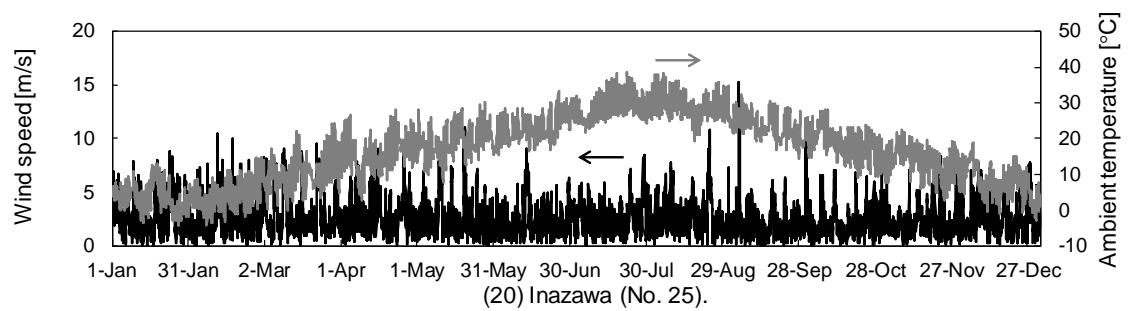
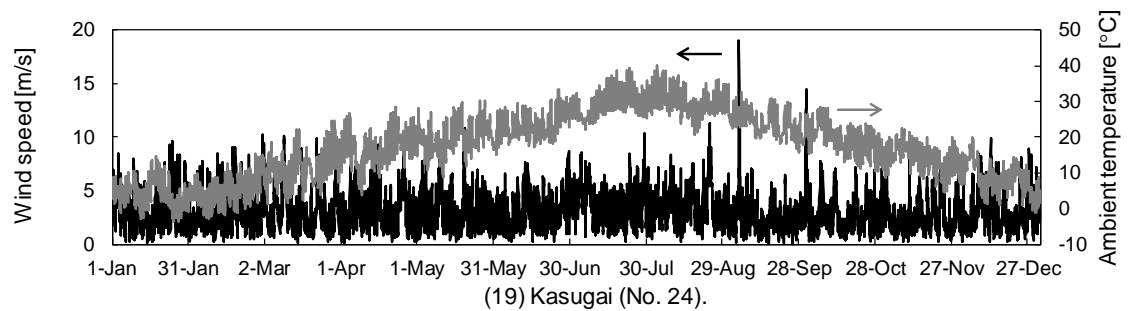
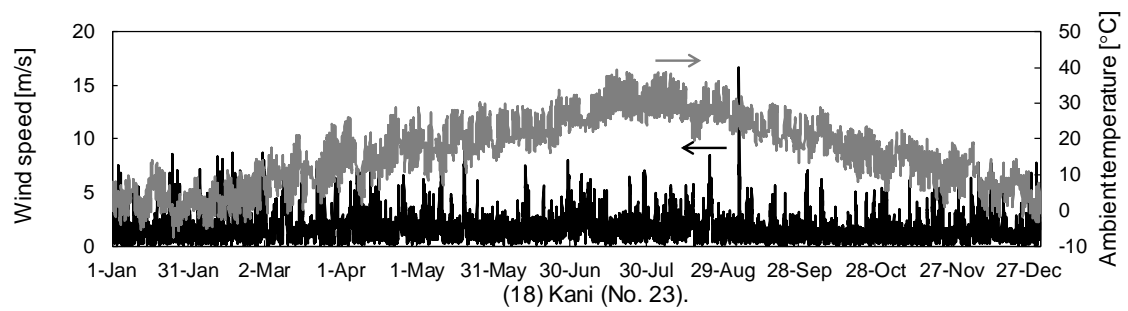


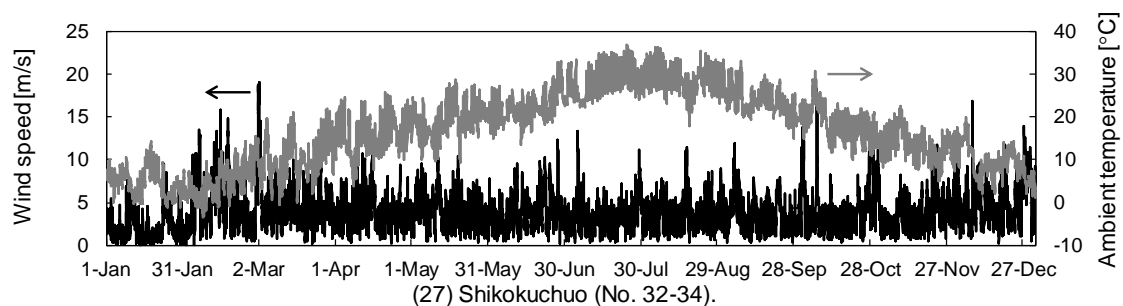
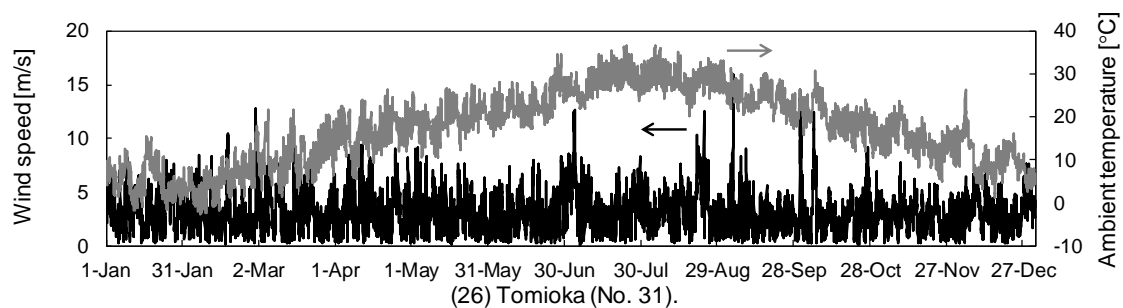
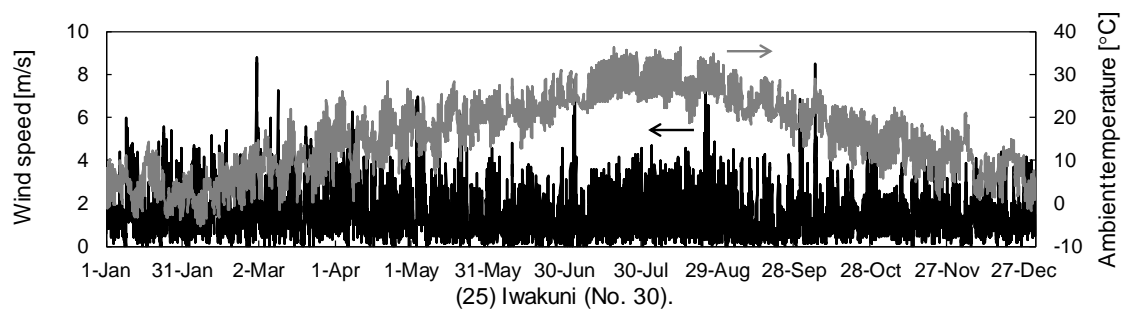
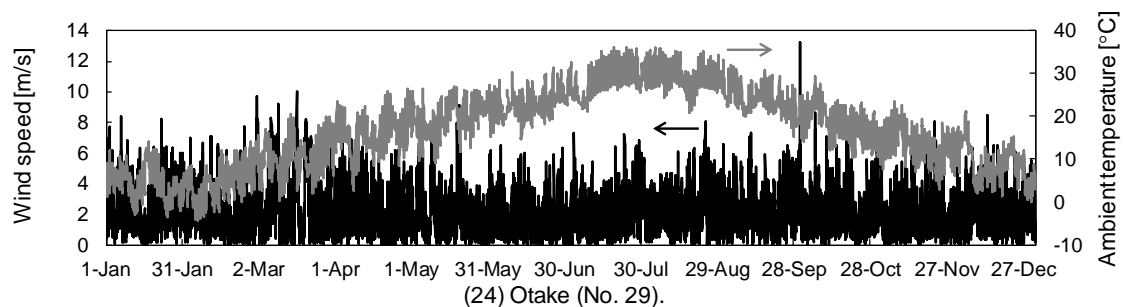
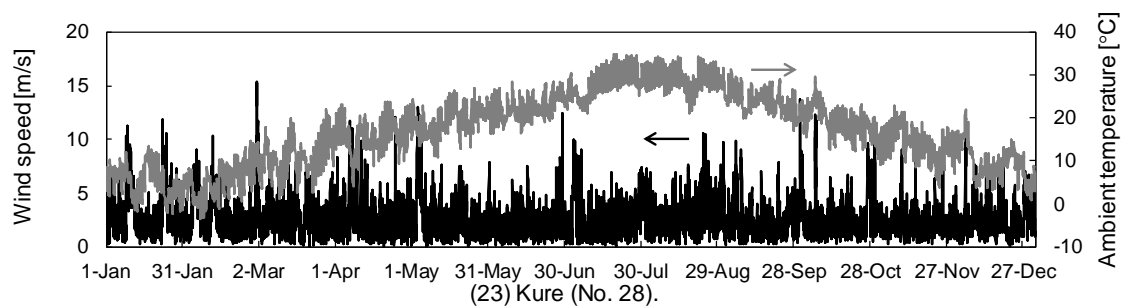
Figure S 1. Operation schedules of the production lines.













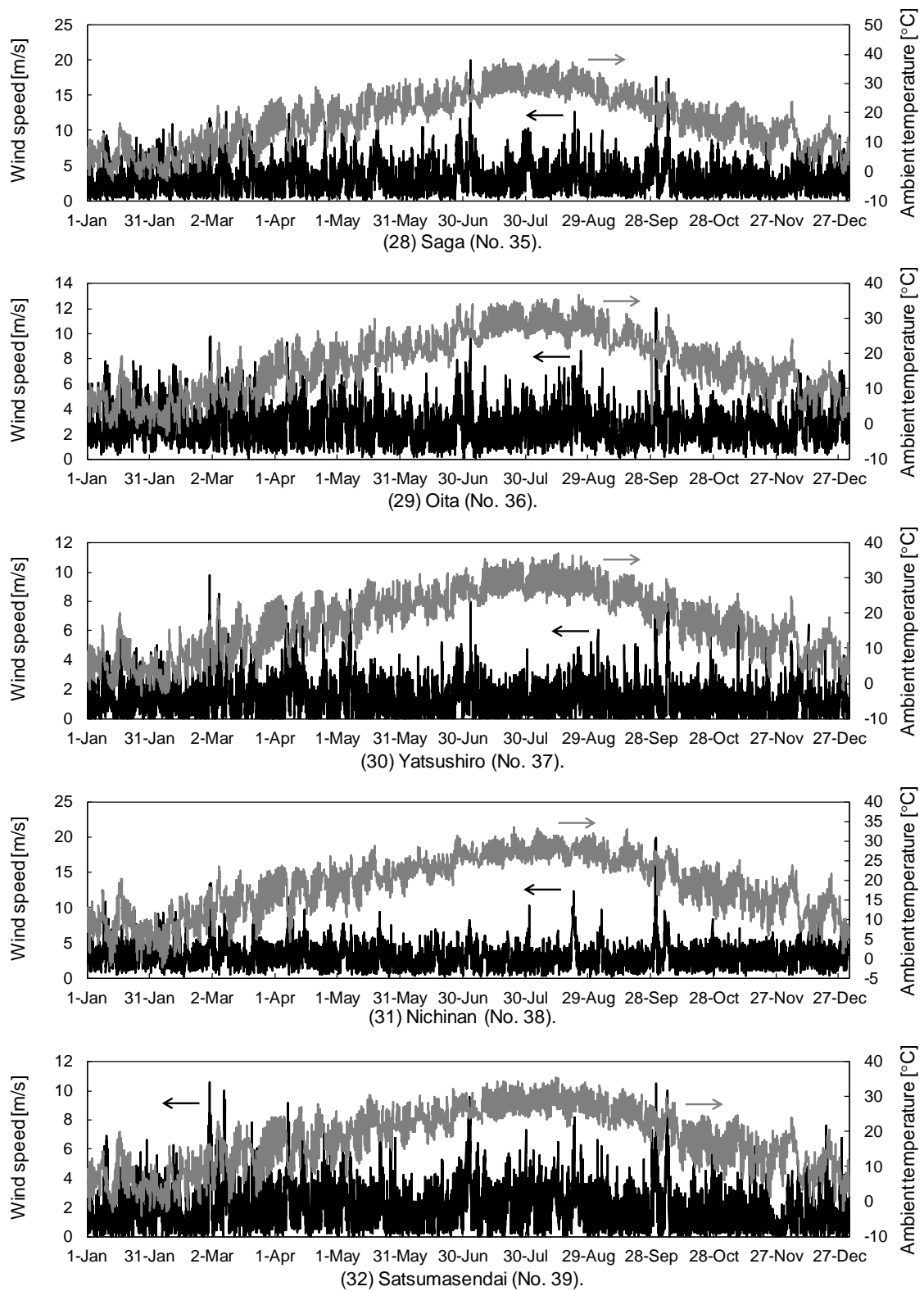
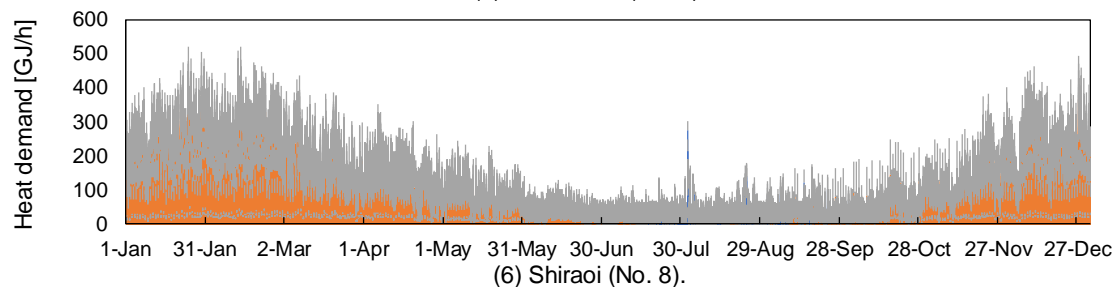
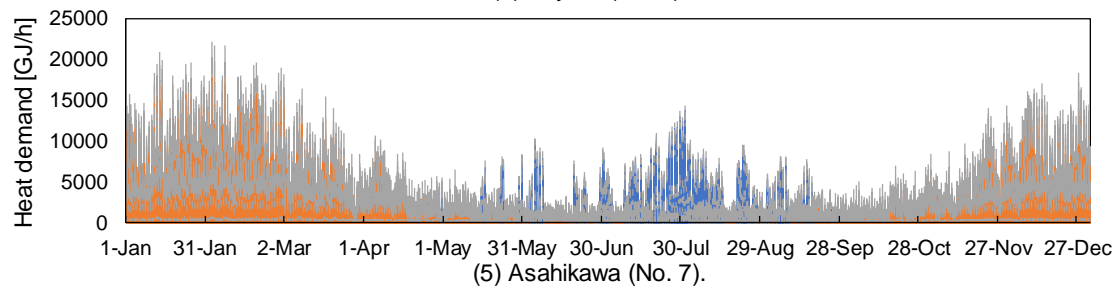
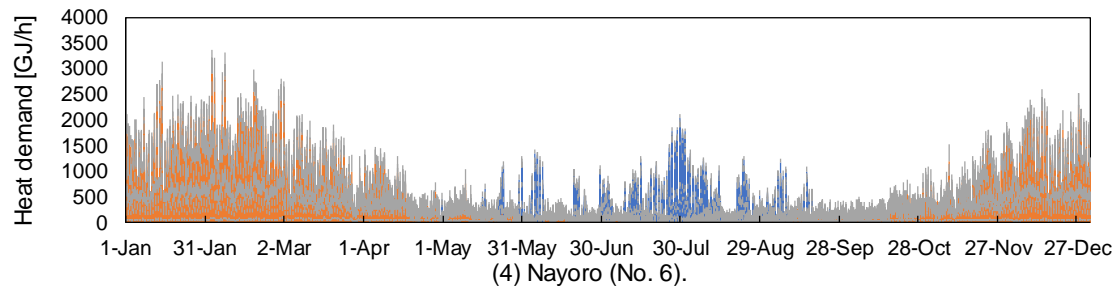
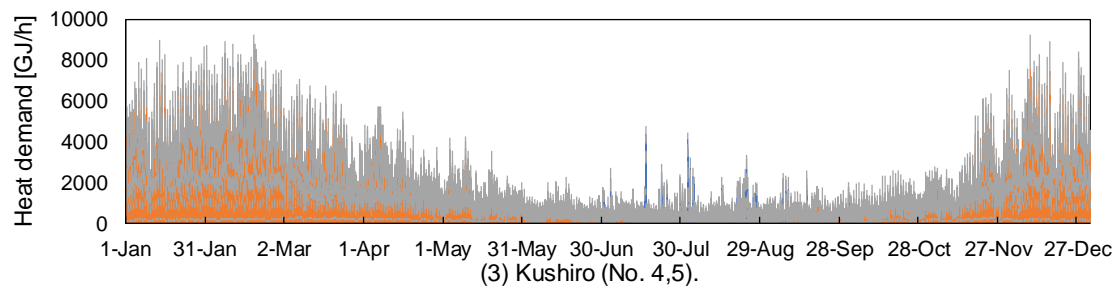
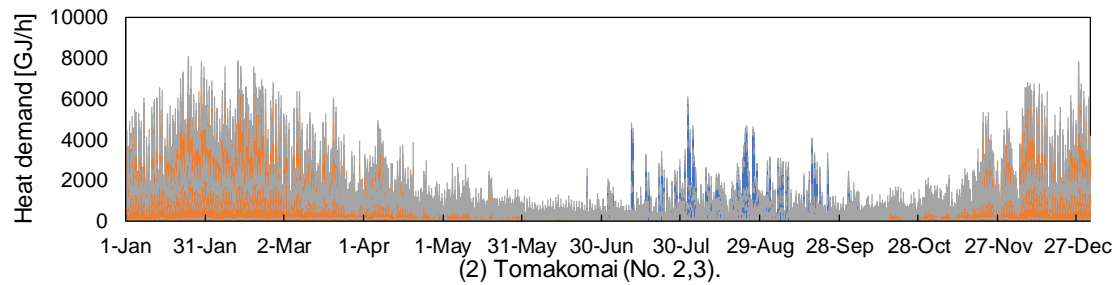
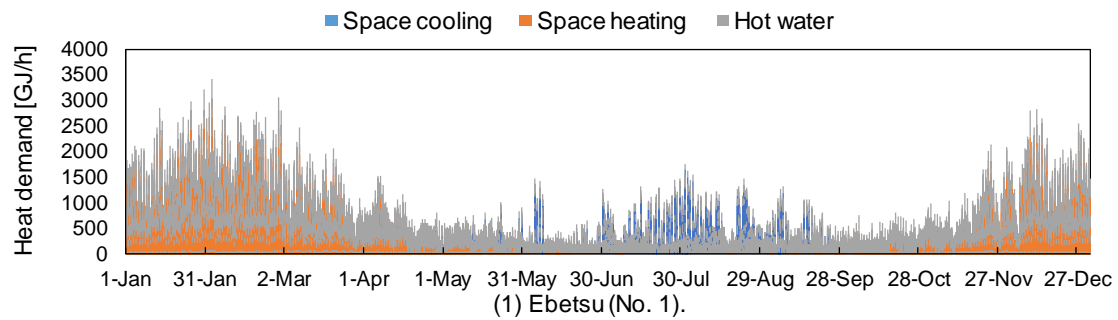
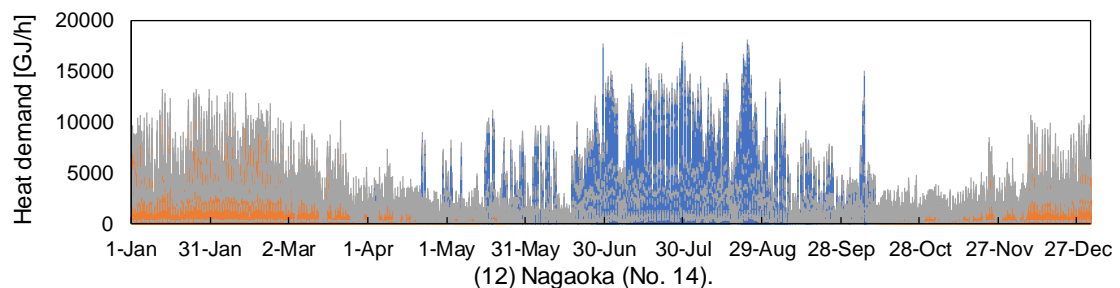
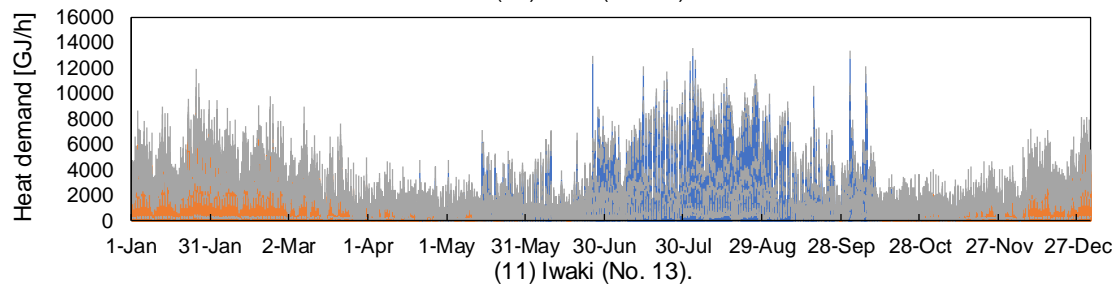
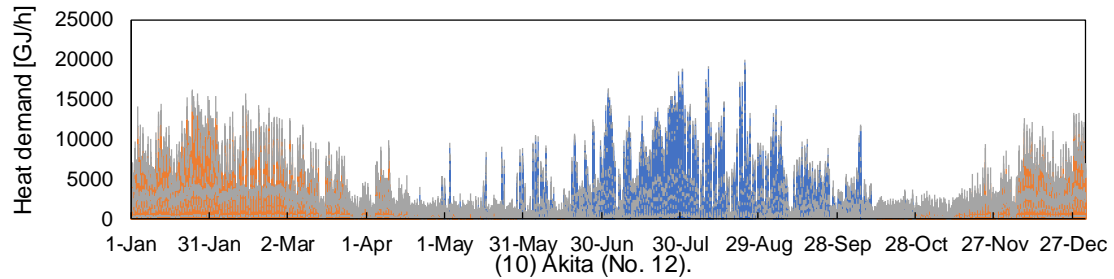
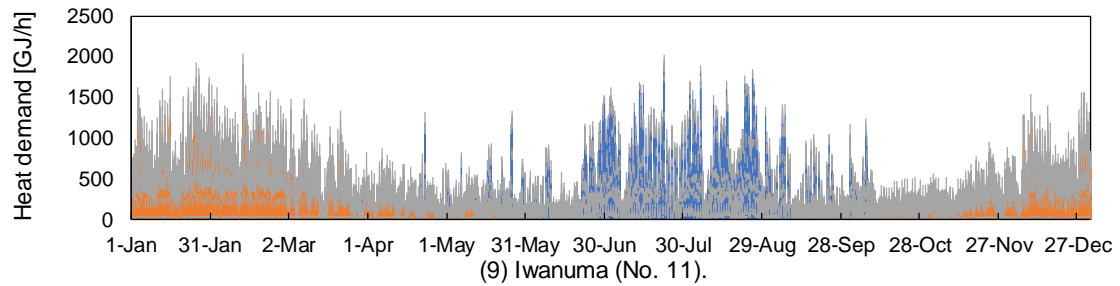
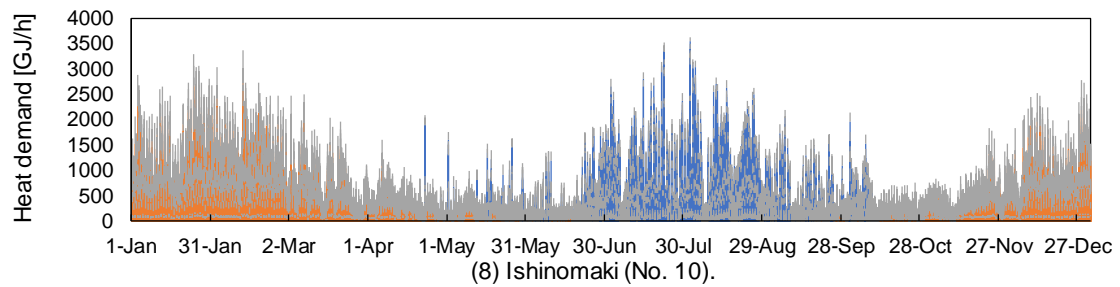
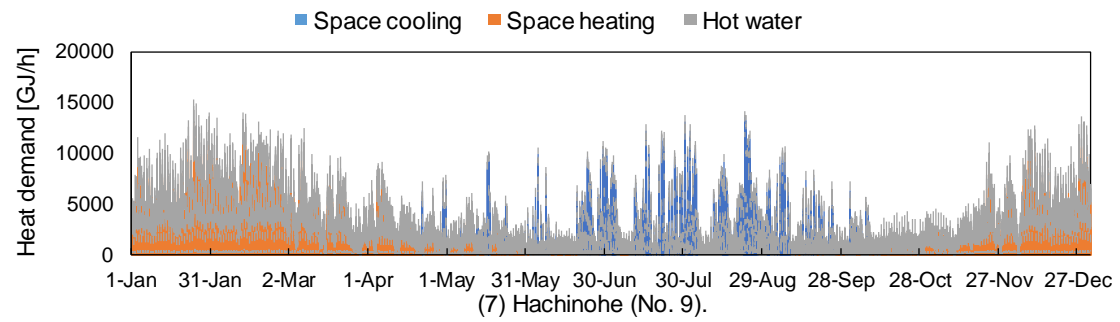
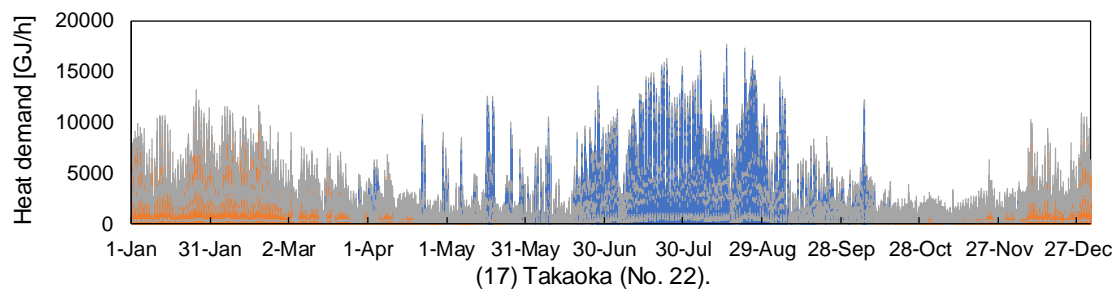
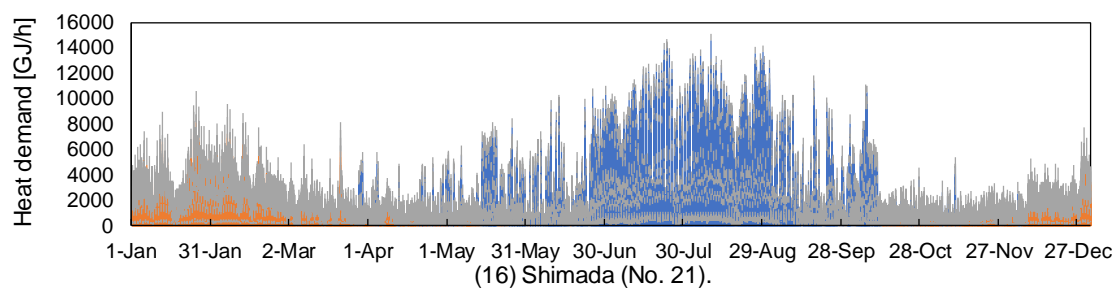
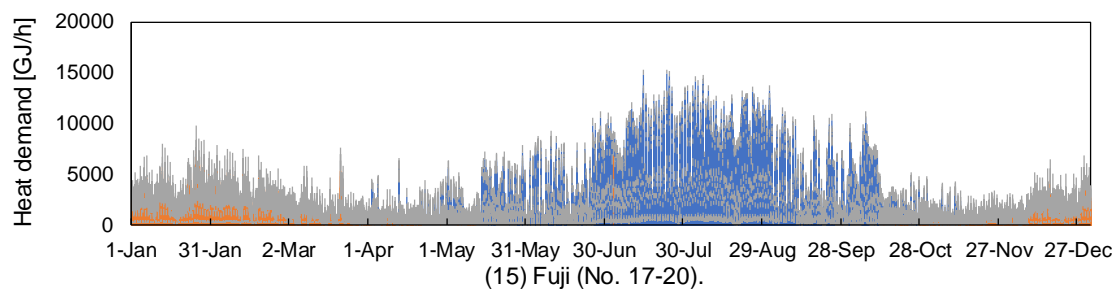
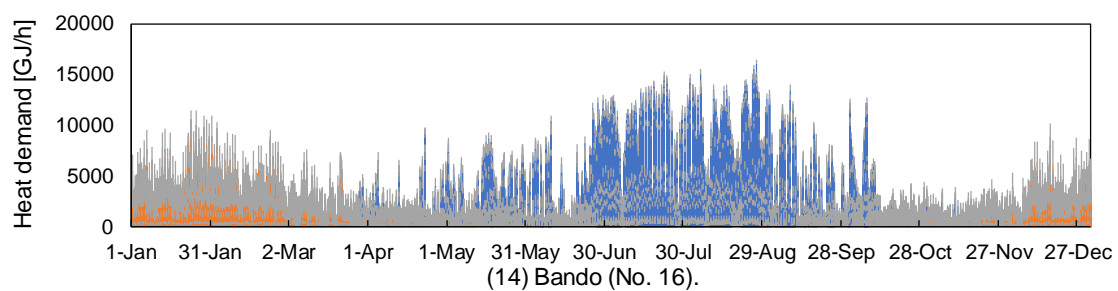
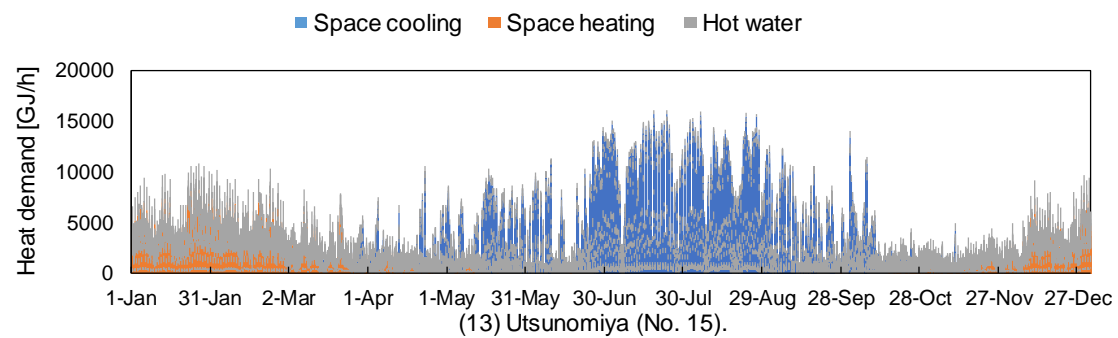
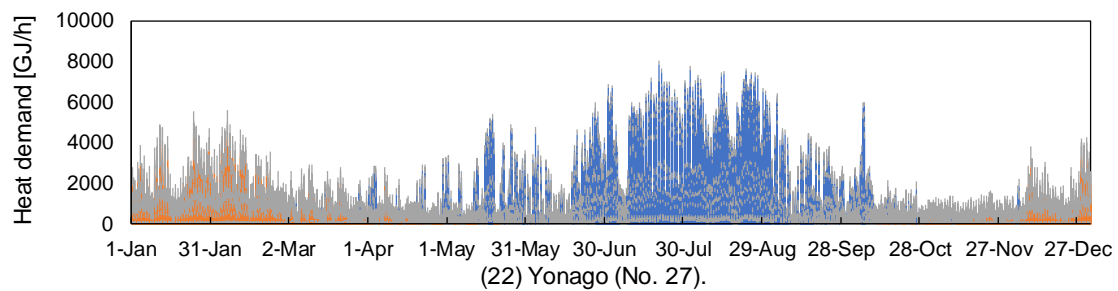
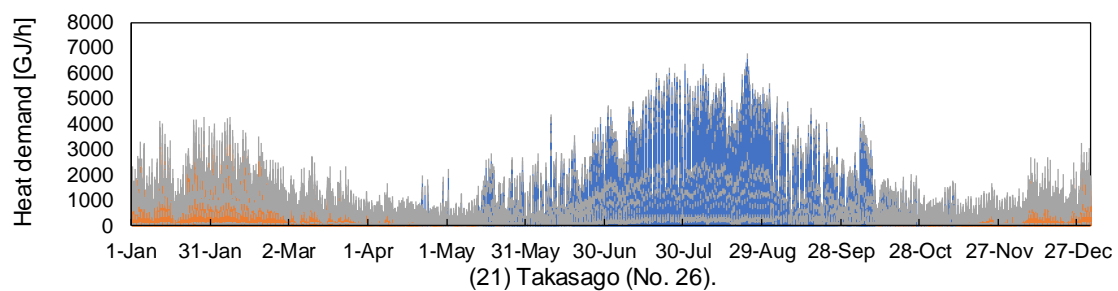
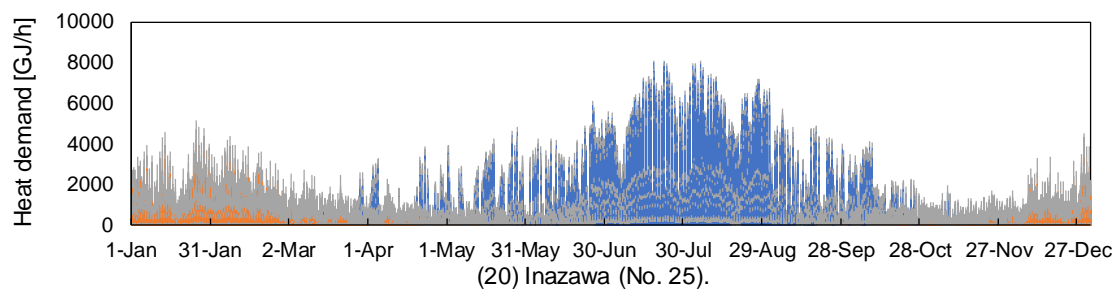
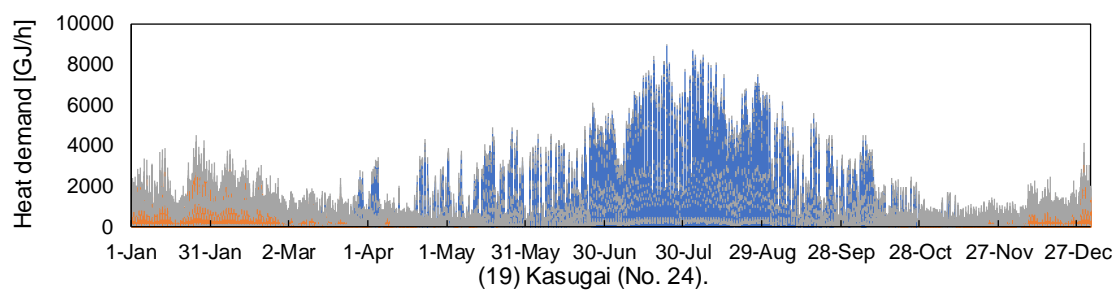
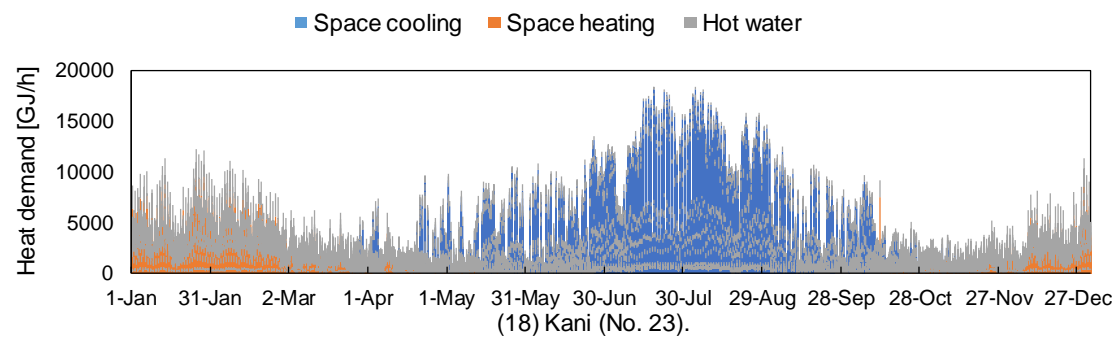


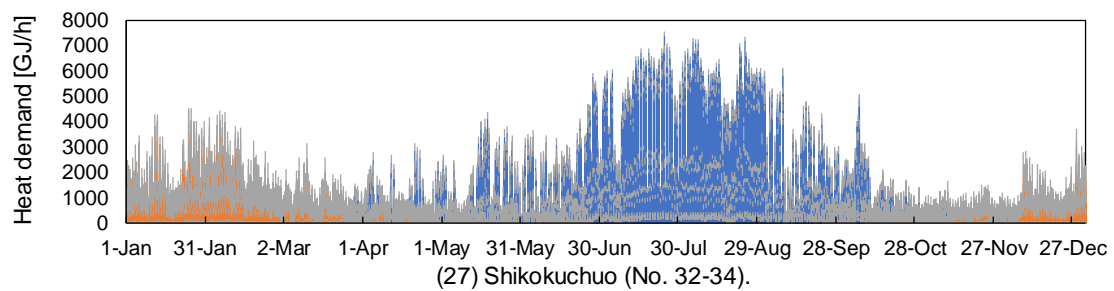
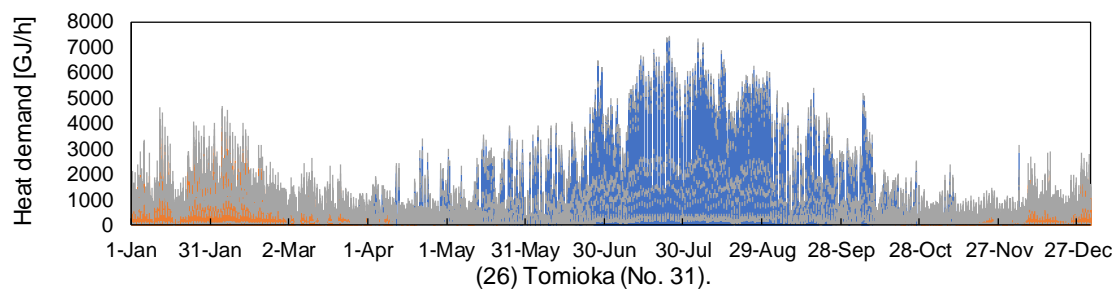
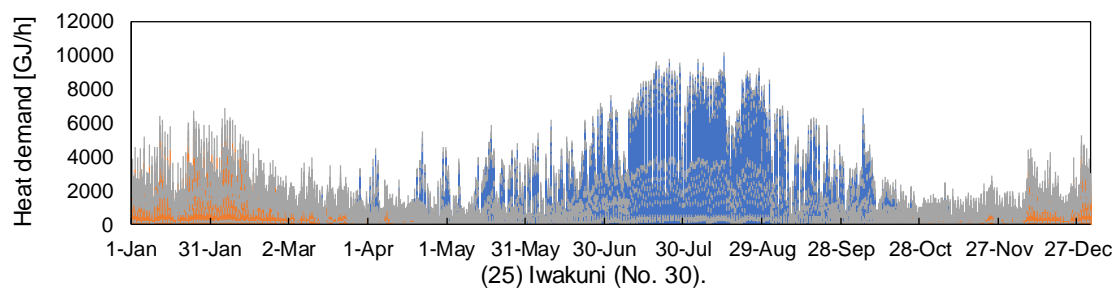
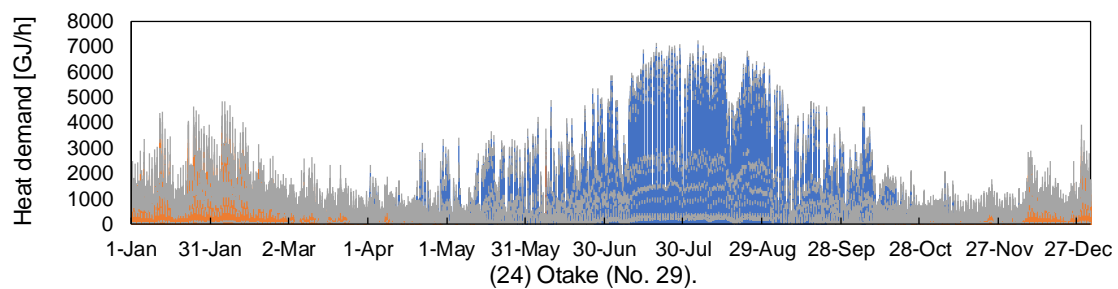
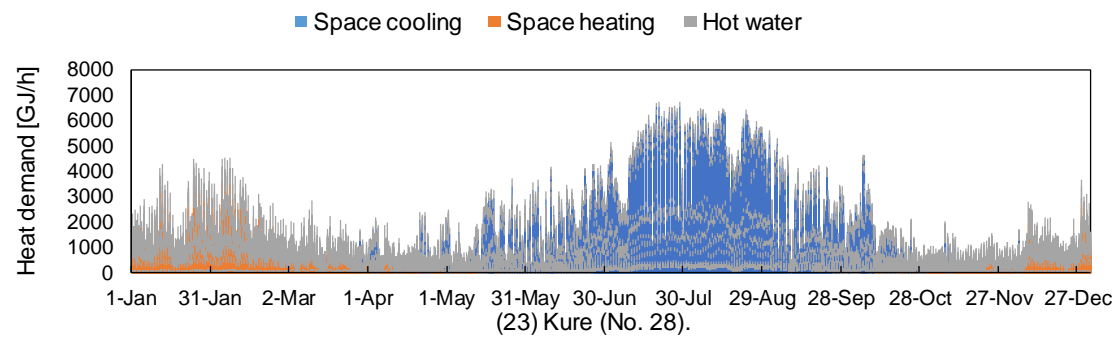
Figure S 2. Wind speed and ambient air temperature, 2018 [116].











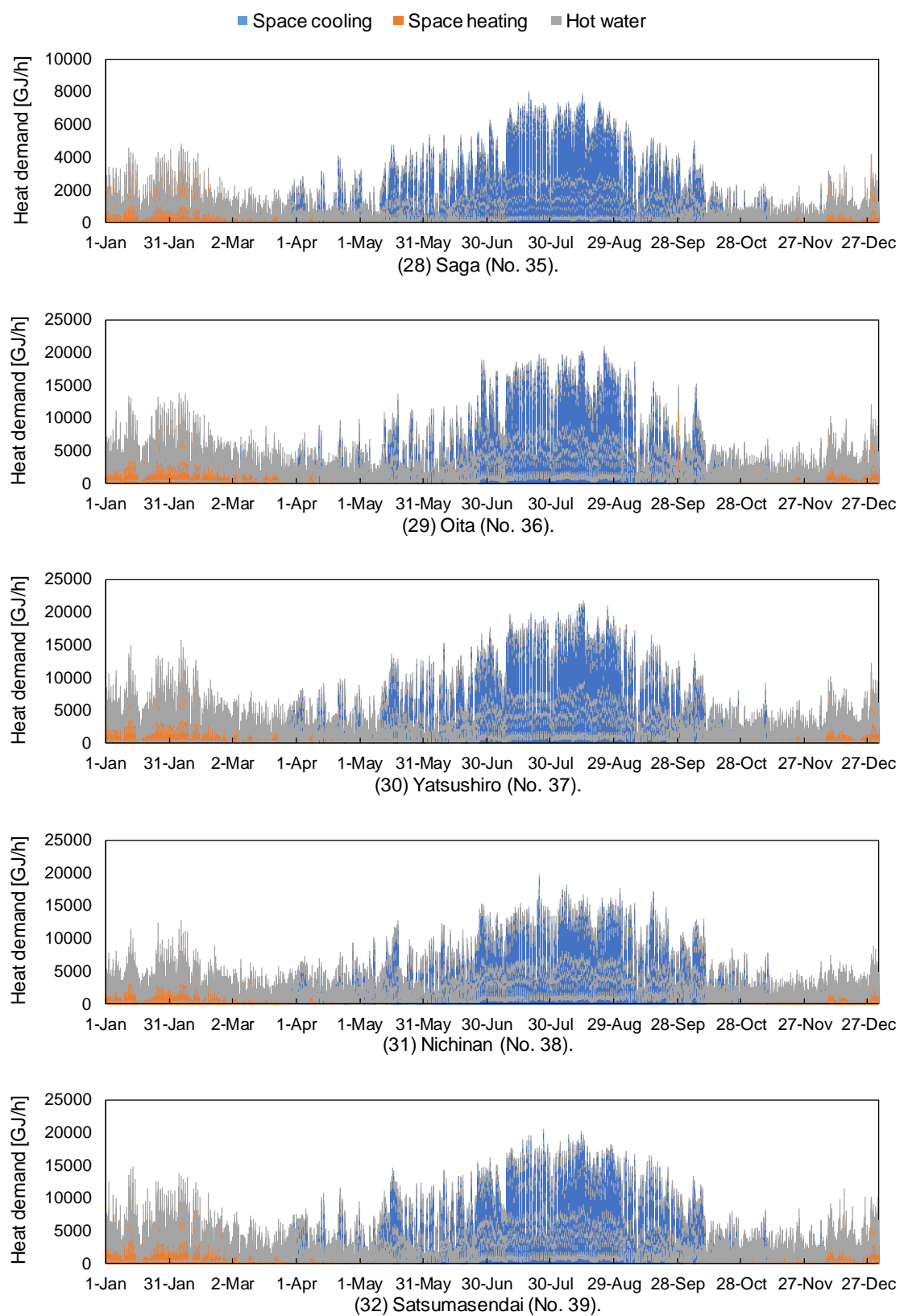


Figure S 3. Estimated heat demand.