

用途変換を考慮した 部品循環システムの設計

神奈川大学工学部経営工学科

生産・流通マネジメント研究室

橋本悠汰

目次

1. 背景

- 1.1 従来の循環システム
- 1.2 用途変換モデルの提案
- 1.3 循環システムに関する従来研究
- 1.4 用途変換の課題

2. 研究目的

3. 用途変換モデルの構築

- 3.1 用途変換モデルの提案
- 3.2 モデルの前提条件と主な制約
- 3.3 性能ランク付け
- 3.4 用途変換可否マトリクス
- 3.5 運用コスト

4. 用途変換モデルのシミュレーション

- 4.1 シミュレーションモデル概要
- 4.2 用途変換を行わないモデル(従来)
- 4.3 用途変換を行うモデル
- 4.4 回収品振り分け
- 4.5 リユース及び用途変換実行判断
- 4.6 シミュレーション条件

5. シミュレーション結果

- 5.1 シミュレーション結果：環境評価
- 5.2 提案モデルのコスト評価方法
- 5.3 各コスト比率が採算性に及ぼす影響
- 5.4 新造調達コストと用途変換コスト比率が総コスト差に及ぼす影響

6. まとめ

1.1 従来の循環システム

- 製造業では、深刻な地球温暖化や資源枯渇問題を解決するために、環境負荷の低減を目的とした循環型生産システムの構築が求められる

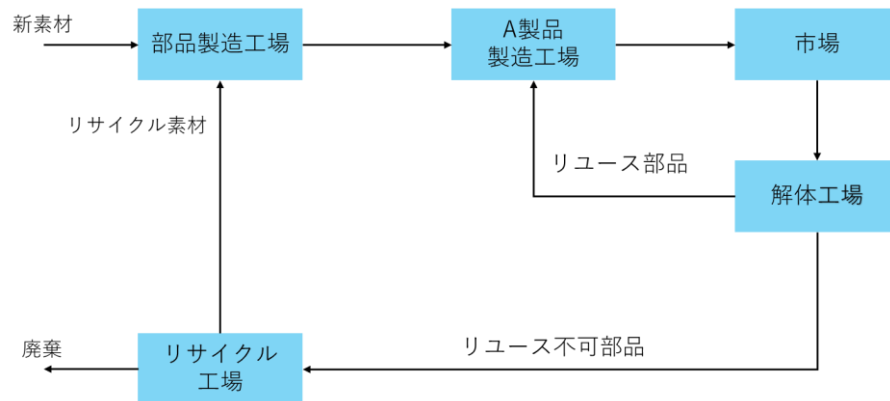


図1.循環型従来モデル

同一製品内での循環が主な対象

残存価値がある部品でも機能、設計上の都合により廃棄、リサイクルされてしまうことが課題
Ex) 車載用リチウムイオンバッテリー

1.2 用途変換モデルの提案

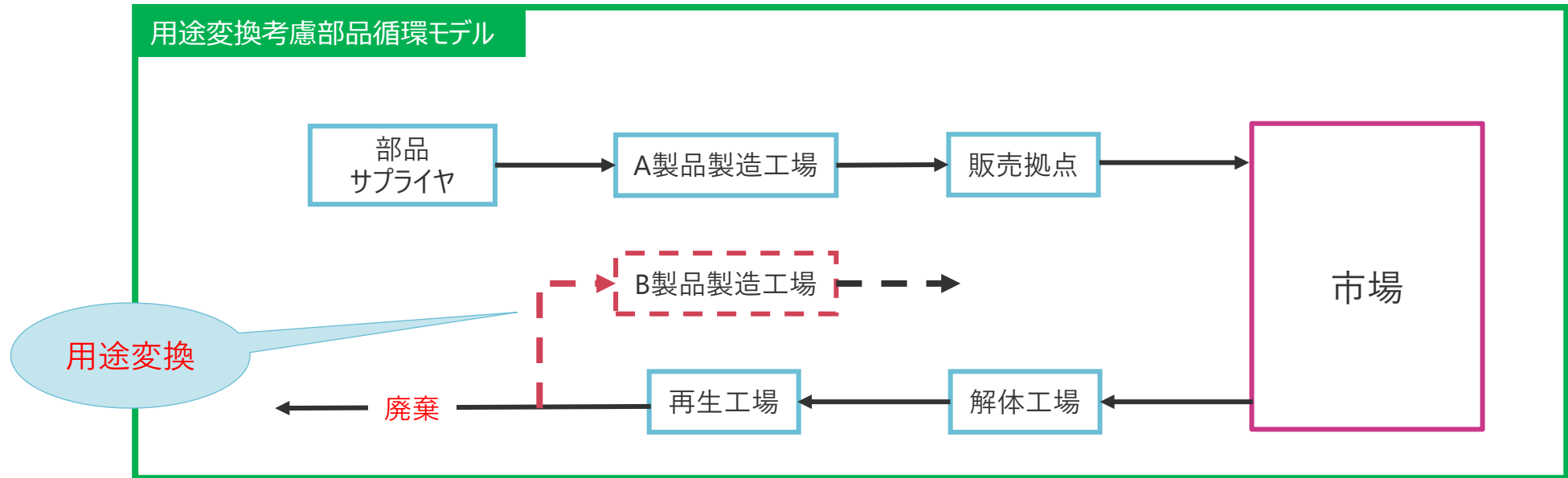


図2.用途変換考慮部品循環モデル

- 同一製品の要求性能を満たさない回収部品でも対応できる製品へ用途変換を行う
 - 用途変換先を多く持たせることで再利用を促進出来る可能性
 - 用途変換を一回だけでなく多段階を想定することで、部品が社会に対して生涯どれだけ貢献したかを評価する必要がある

1.3 循環システムに関する従来研究

表1.循環システムに関する従来研究と本研究の違い

No.	考慮領域					概要
	設計	製造	リユース	リサイクル	複数製品適用	
No.1 [1]	◎	○	◎	-	-	様々な多段階循環シナリオやその管理方式を比較できるライフサイクルシミュレーションシステムの開発
No.2 [2]	◎	○	○	○	-	多世代製品ライフサイクルを統合的に設計する上で課題となる製品ライフサイクルの特性に基き、量と質のバランスを設計し、安定した循環を成立させる循環バランスの設計を支援するための設計対象のモデリング手法を提案
No.3 [3]	○	○	○	○	-	部品再生コストと新造部品コストとの関係が循環型生産システムの導入により受ける影響を明確化
:	:	:	:	:	:	:
No.13 [13]	○	○	◎	-	-	リユースされる製品の割合の工場と再生処理企業の利益の工場を考慮した交渉モデルを提案
本研究	○	○	○	-	◎	他製品への転用を考慮した部品循環システムの設計

□ いずれの従来研究も単一製品の部品の循環を対象としている

→本研究では複数製品適用を考慮事項に含む

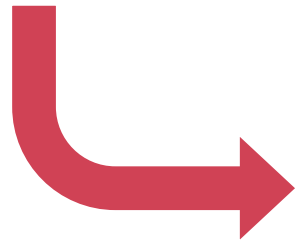
1.4 用途変換の課題

□ 用途変換例(車載用リチウムイオン電池)

- 三菱自動車, MIRAI-LABO[14]
電動車の使用済みバッテリーを用いた自立型街路灯の開発
- フォーアールエナジー[15]
電気自動車の中古バッテリーを小規模施設の定置型蓄電池として用い有効性等を検証

□ 用途変換の課題

車載用リチウムイオン電池において検証が進んでいるが, 変換先の用途はおおむね固定されており回数も限定されている



- 循環型生産システムを実現する際の用途変換先の選定
- 多段階運用時に想定される環境評価と運用コスト評価とのトレードオフ評価

2 研究目的

□ 本研究の目的

- 用途変換の有効性の定量評価
- 用途変換が促進されるコスト指標を明らかにする



用途変換を考慮した循環型シミュレーションモデルを構築し検証する

NTTデータ数理システム社製S4(S-Quattro Simulation System)

モノの動きとコストに及ぼす影響を検証するために
待ち行列を表せるS4を用いる

3.1 用途変換モデルの提案

従来型循環モデルと用途変換考慮循環モデルの比較を示す

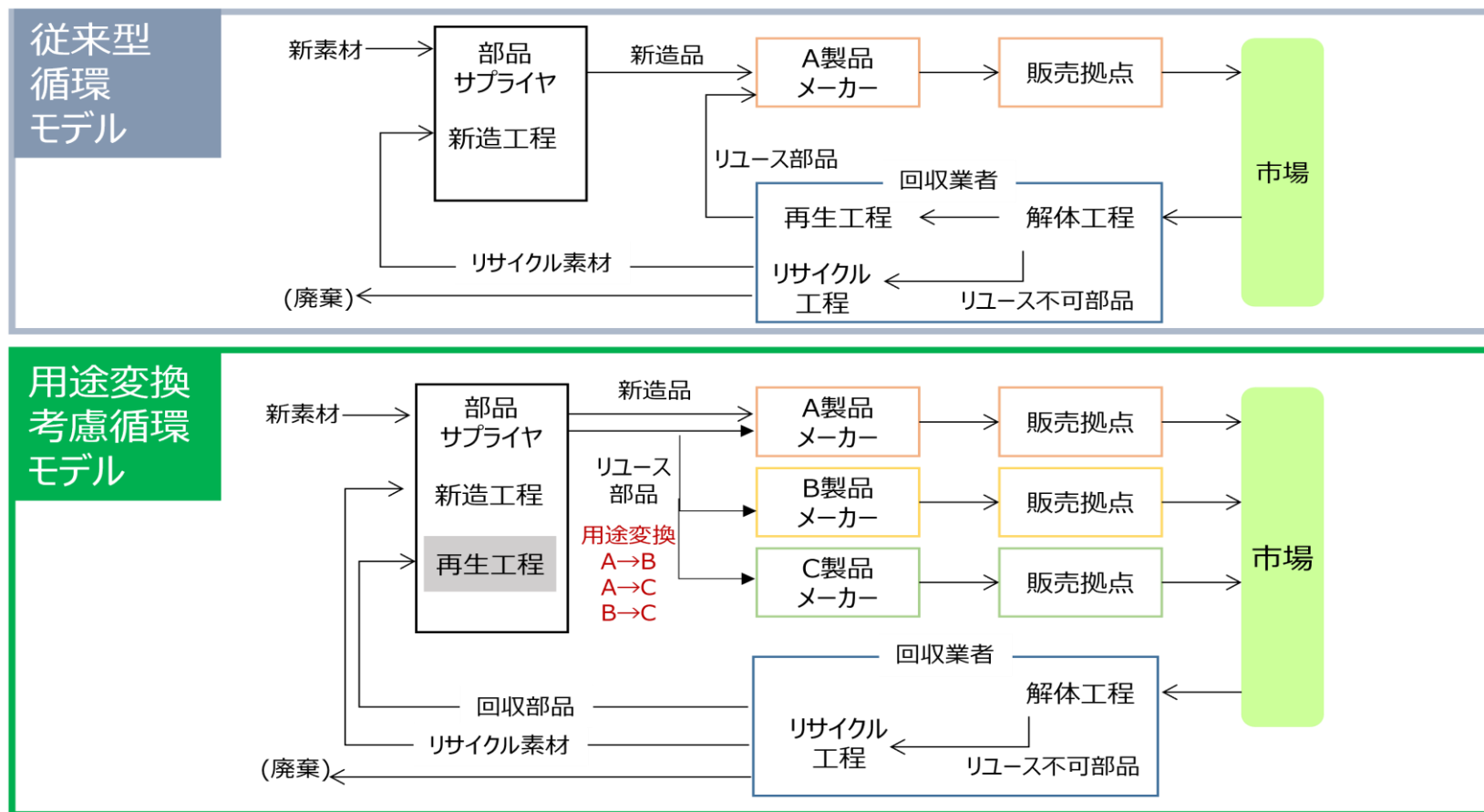


図3.従来型循環モデルと用途変換考慮循環モデル

3.2 モデルの前提条件と主な制約

□前提条件

以下の情報は与えられるものとする

- 各製品の期別需要量
- 各製品の期別回収量
- 回収部品のランク比率
- 回収部品の用途変換可否マトリクス

□主な制約

- 各製品の製造工場における期別生産能力
- 解体工場における期別の解体可能数
- 各製品の期別出荷計画の充足
- 各製品の出荷から回収までの期間

3.3 性能ランク付け

- 回収部品の劣化度合にはバラツキ
→性能劣化曲線は使用条件によって異なる

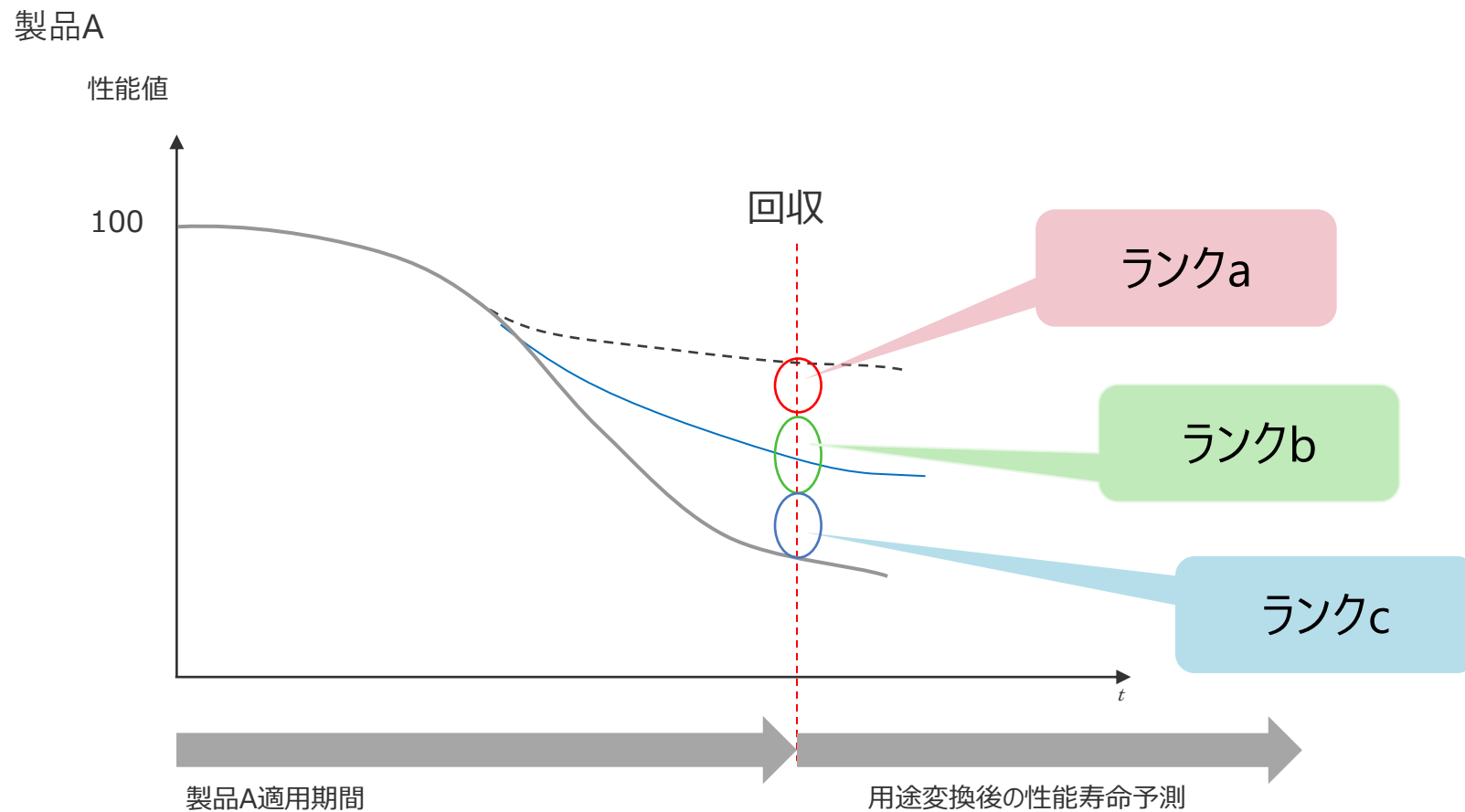


図4.劣化曲線と性能ランク

3.4 用途変換可否マトリクス(A製品)

部品の流用については，回収部品の性能ランクと適用可能な製品をマトリクスで定義する

表2.A製品用途変換可否マトリクス

A製品回収部品		転用先製品		
		A製品	B製品	C製品
性能 ランク	ランクa	○	○	○
	ランクb	×	○	○
	ランクc	×	×	○

○：転用可能，×：転用不可

A製品から回収したランクb回収部品はB製品，C製品に転用可能

→基本的にランクb回収部品はB製品へ転用

→部品在庫が余っておりC製品需要がある場合，C製品へ転用

3.4 用途変換可否マトリクス(B, C製品)

部品の流用については、回収部品の性能ランクと適用可能な製品をマトリクスで定義する

表3.B製品用途変換可否マトリクス

B製品回収部品		転用先製品		
		A製品	B製品	C製品
性能 ランク	ランクa	×	×	×
	ランクb	×	○	○
	ランクc	×	×	○

○：転用可能， ×：転用不可

B製品からの回収部品ではランクaは発生しない

表4.C製品用途変換可否マトリクス

C製品回収部品		転用先製品		
		A製品	B製品	C製品
性能 ランク	ランクa	×	×	×
	ランクb	×	×	×
	ランクc	×	×	○

C製品からの回収部品ではランクa， ランクbは発生しない

3.5 運用コスト

表5.運用コスト詳細(池澤ら[16]を参考に作成)

コスト要素	設定内容	領域
新造部品調達コスト	部品を新たに調達する際の一個当たりの調達価格	製造
部品在庫コスト	部品1個あたりの期ごとの在庫費用	
製品製造コスト	製品1個あたりの製造に要する費用	
製品在庫コスト	製品1個あたりの期ごとの在庫費用	
製品輸送コスト	製品1個あたりの輸送ルート別費用	
製品回収コスト	製品1個あたりの、回収ルート別費用	解体
製品解体コスト	製品1個あたりの、再利用する部品を取り出すのに要する費用	
リユースコスト	回収部品1個あたりのリユースさせるための費用	
回収部品在庫コスト	回収部品1個あたりの期ごとの費用	
回収部品輸送コスト	回収部品1個あたりの梱包、および輸送ルートごとの費用	
廃棄コスト	回収部品1個あたりの廃棄に必要となる費用 (一定期間使用されない在庫は廃棄対象)	
用途変換コスト	回収された部品を用途変換させるための費用	

4.1 シミュレーションモデル概要(用途変換を行わない)

用途変換を行うモデルと行わないモデルでモノの動きとコストに及ぼす影響を検証するため、待ち行列シミュレータを用いて以下のような簡易モデルを構築した

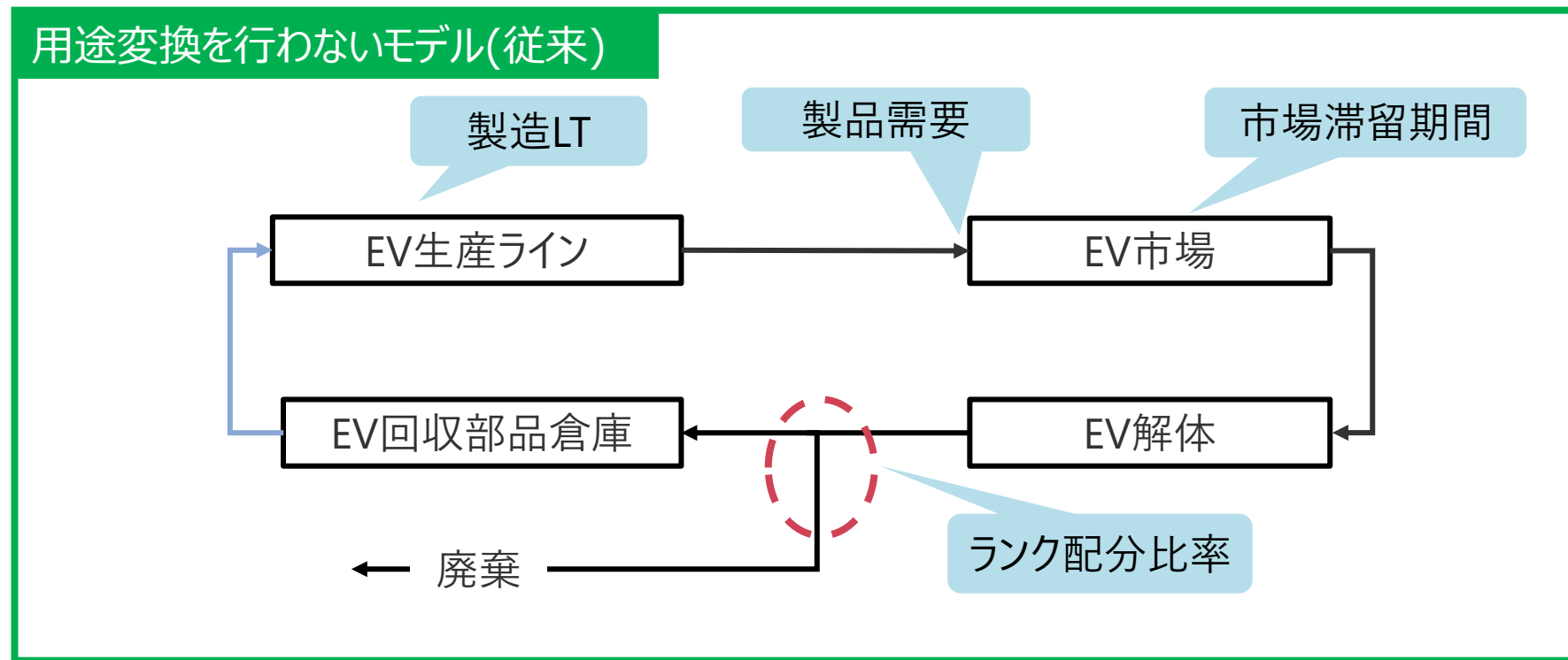
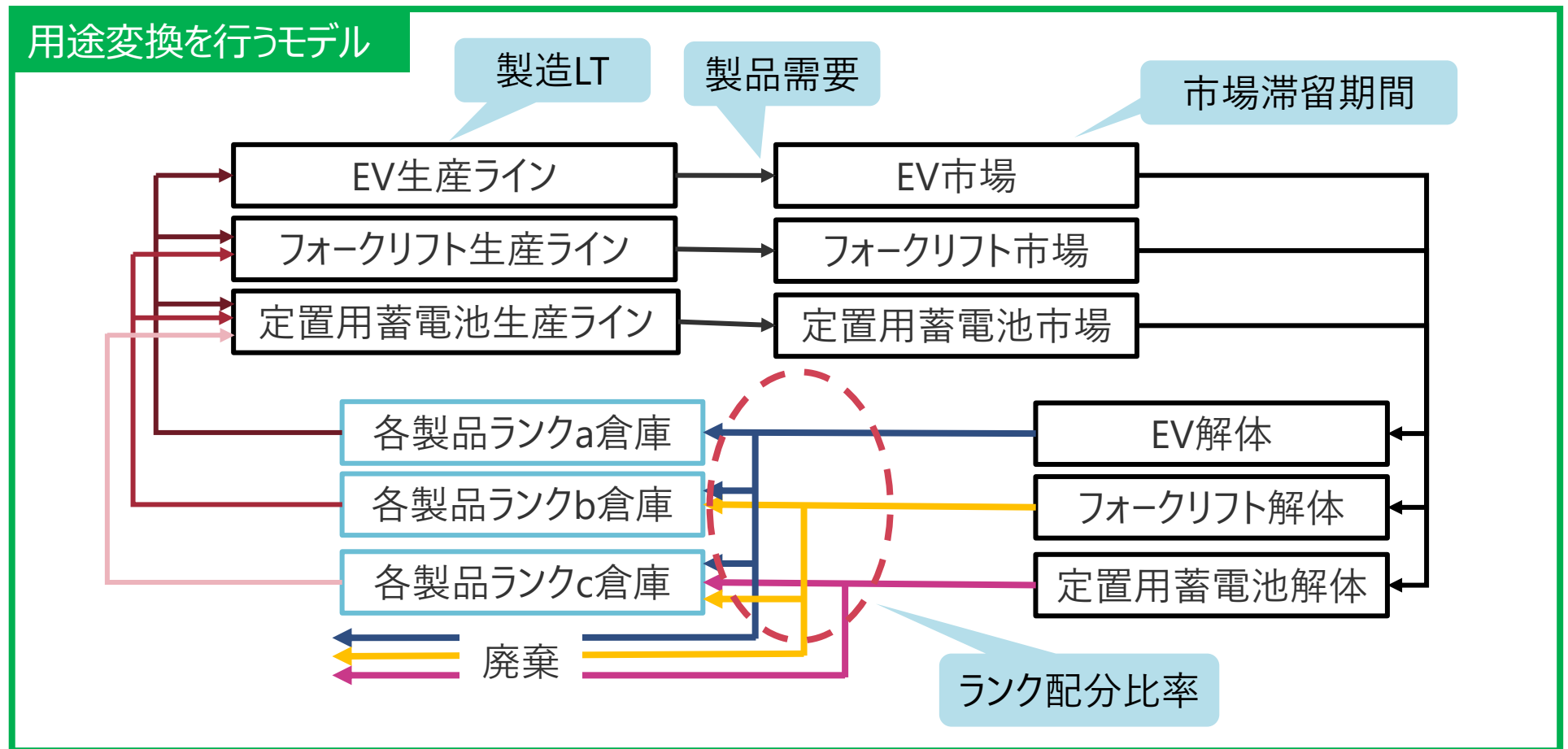


図5.用途変換を行わないモデル(従来)

想定製品：EV

4.1 シミュレーションモデル概要(用途変換を行う)

用途変換を行うモデルと行わないモデルでモノの動きとコストに及ぼす影響を検証するため、待ち行列シミュレータを用いて以下のような簡易モデルを構築した



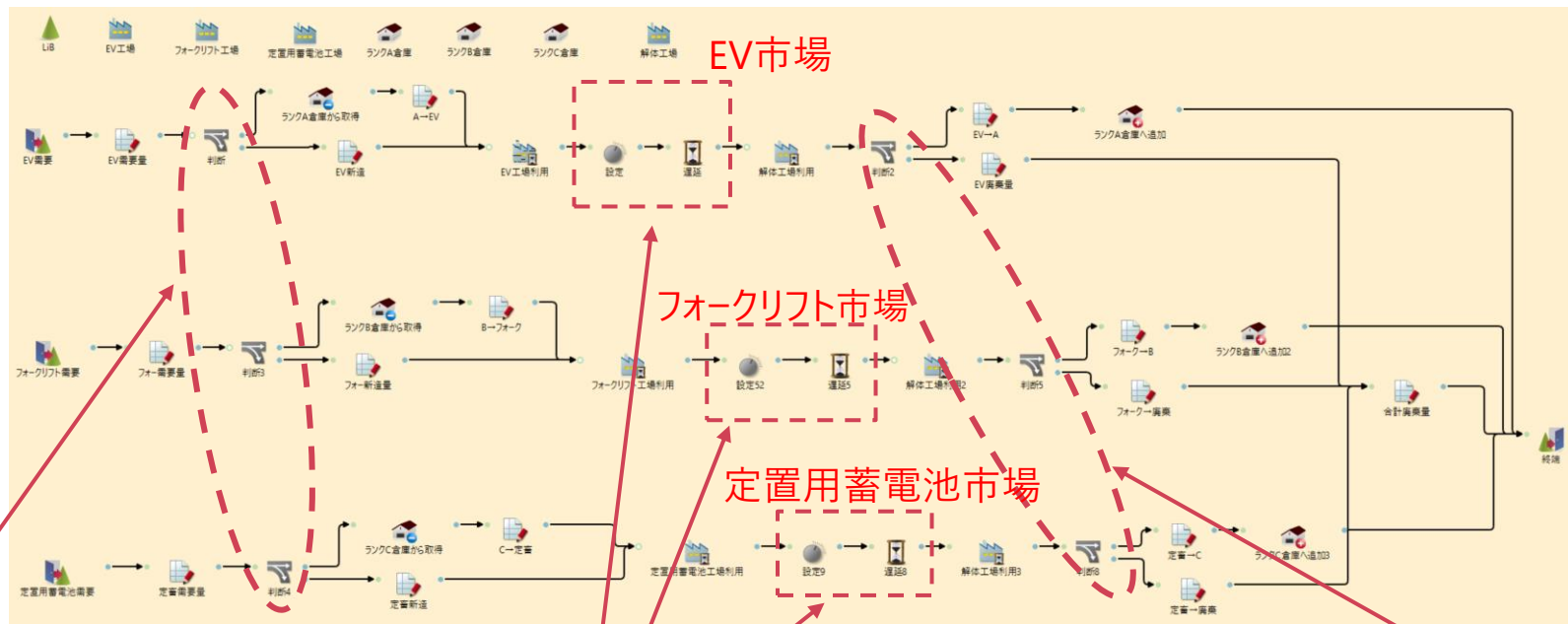
想定製品：EV，フォークリフト，定置用蓄電池

図6.用途変換を行うモデル

4.2 用途変換を行わないモデル(従来)

- ・対象製品
3製品(EV,フォークリフト,定置用蓄電池)
- ・用途変換対象部品
1部品(バッテリー)

S4で作成したシミュレーションモデル



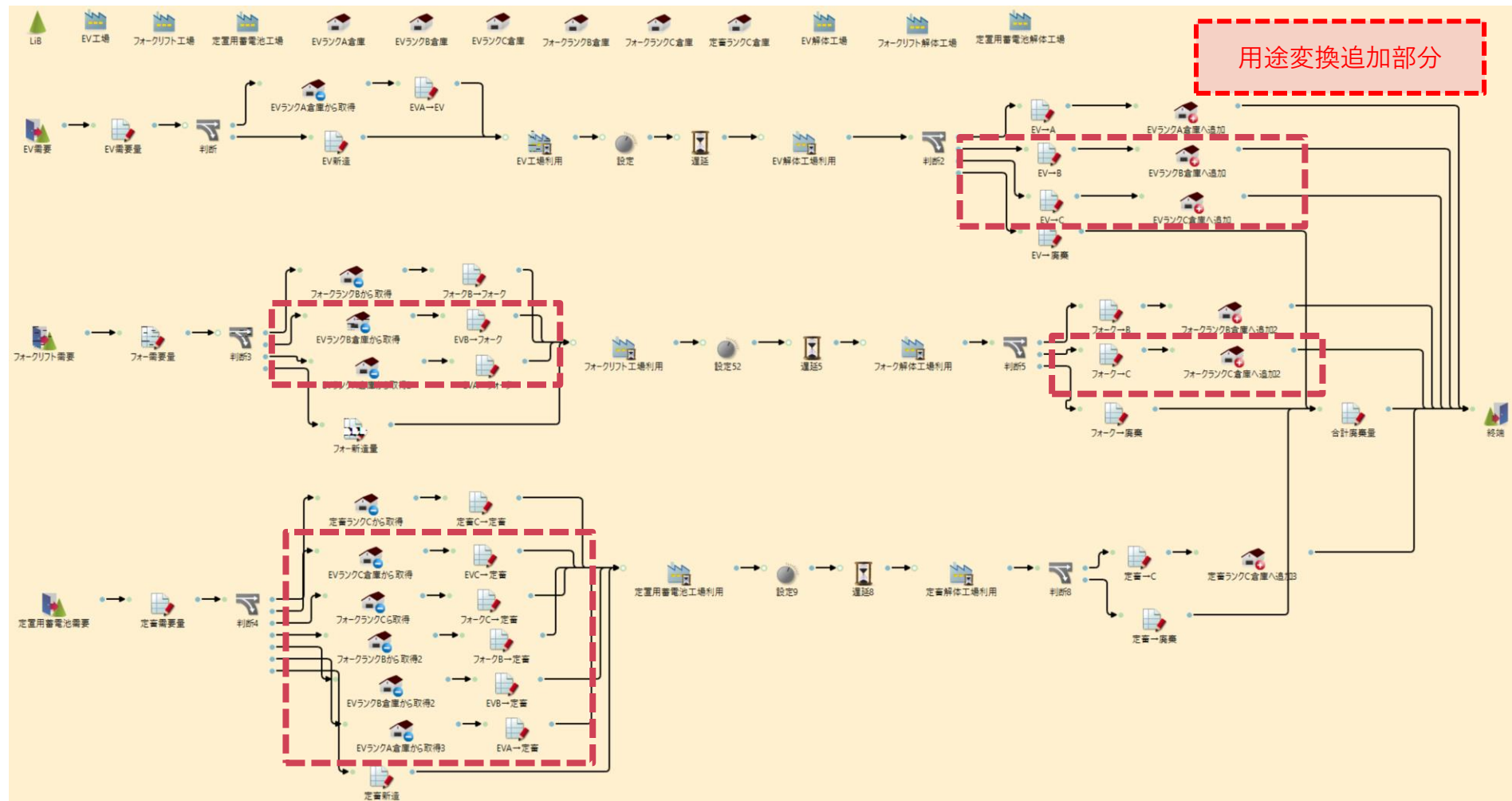
回収部品倉庫に在庫があるか確認
→あれば取得(リユースに相当)
→なければ新造品調達

市場滞留期間設定(正規分布)
→正規分布にて与えられた単位時間
滞留した後、解体工程へと流れる

劣化判断
20%→リユース
80%→廃棄

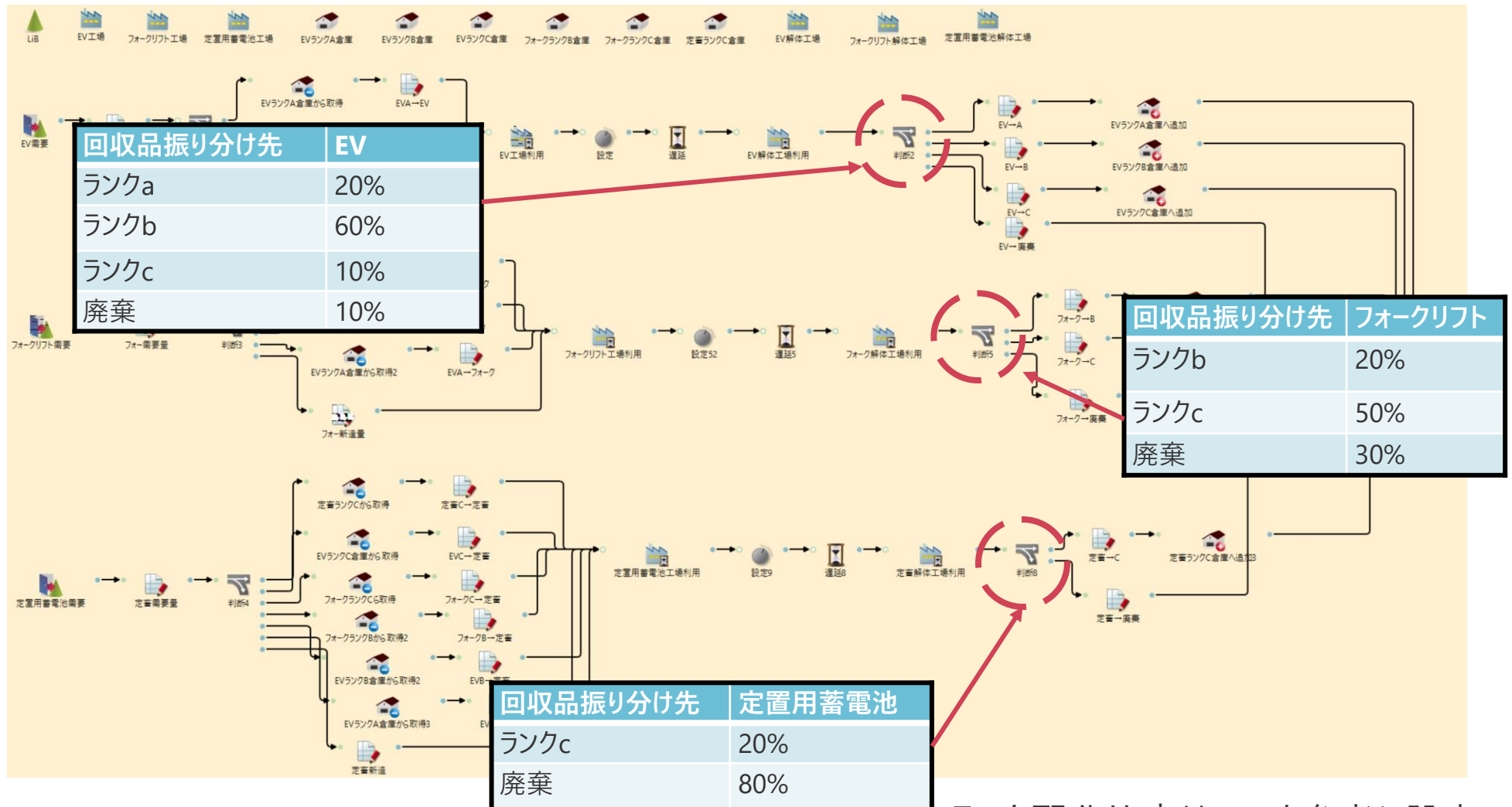
4.3 用途変換を行うモデル

従来循環型モデルに用途変換部分(赤枠)を追加したモデルの全体図



4.4 回収品振り分け

回収部品の劣化状態に応じて配分比率を設定

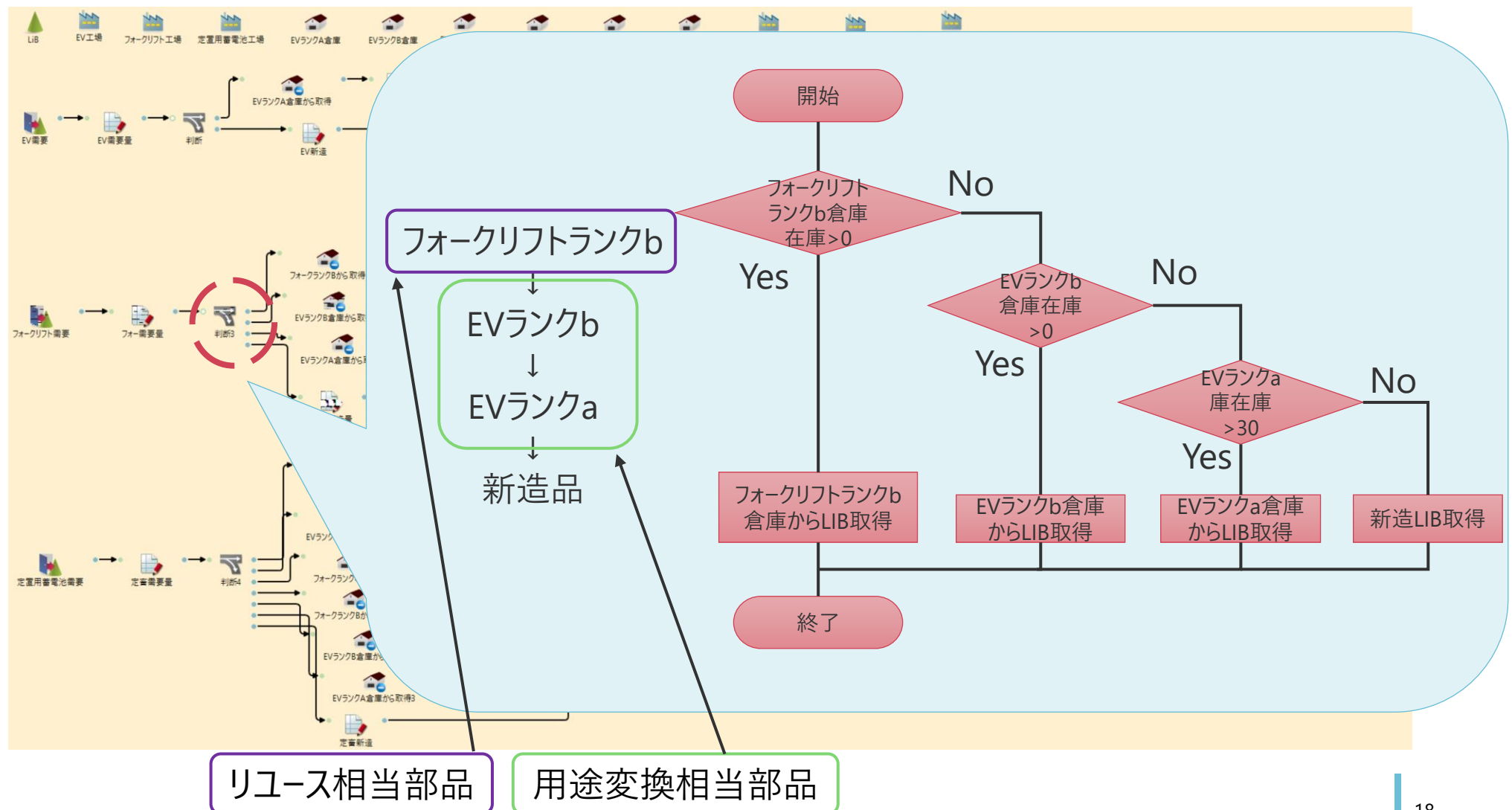


ランク配分比率は[15]を参考に設定

4.5 リユース及び用途変換実行判断

・在庫判断フロー

リユース部品在庫があるかを確認し、リユース部品があれば取得し、なければ用途変換部品在庫があるかを確認。もし用途変換部品在庫もなければ新造品を調達



4.6 シミュレーション条件

表6.シミュレーション条件詳細

条件項目		設定値
アイテム生成	EV	1単位1個
	フォークリフト	1単位1個
	定置用蓄電池	1単位1個
初期需要発生時間	EV	0単位時間
	フォークリフト	3000単位時間
	定置用蓄電池	3000単位時間
製造LT	EV工場	1単位時間
	フォークリフト工場	1単位時間
	蓄電池工場	1単位時間
	解体工場	1単位時間
工場並列処理数	EV工場	20
	フォークリフト工場	20
	蓄電池工場	20
	解体工場	20
市場滞在LT(正規分布)	EV市場	$\mu:40, \sigma:6$
	フォークリフト市場	$\mu:100, \sigma:6$
	蓄電池市場	$\mu:130, \sigma:6$
シミュレーション時間	1期間(4000単位時間)	4期間(16000単位時間)

※1期間は約5年間想定

5.1 シミュレーション結果：環境評価

表7.用途変換ありと用途変換なしのシミュレーション結果

評価項目		用途変換あり (個)	用途変換なし (個)
新造量	EV	15619	15586
	フォークリフト	11706	12852
	定置用蓄電池	12224	12886
	合計	39549	41324
廃棄量	EV	202	1581
	フォークリフト	233	627
	定置用蓄電池	479	464
	合計	914	2672
リユース量	EVランクa倉庫→EV	388	414
	フォークリフトランクb倉庫→フォークリフト	168	148
	定置用蓄電池ランクc倉庫→定置用蓄電池	116	134
	EVランクa→フォークリフト	0	—
	EVランクb→フォーク	1124	—
	EVランクc→定置用蓄電池	202	—
	EVランクb→定置用蓄電池	80	—
	EVランクa→定置用蓄電池	0	—
	フォークリフトランクb→定置用蓄電池	0	—
	フォークリフトランクc→定置用蓄電池	374	—
	合計	2452	696

- ・廃棄量削減
- ・新造量削減



シミュレーション期間内にて
資源を有効活用出来た

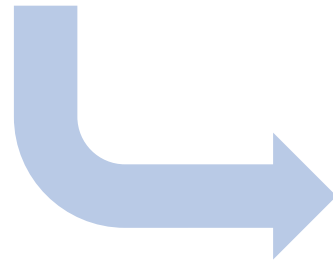
5.2 提案モデルのコスト評価方法

コスト係数パターン別にコストを評価し、用途変換を考慮した部品循環システムの運用コストを評価する

小原ら[3]：費用の構造において3つの場合いずれかに収まる

- ①回収・再生部門のコストが高い場合
- ②高低に差がない場合
- ③新規部品生産部門のコストが高い場合

関連する**コスト比率**がシステム
評価に影響する



今回検証

解体領域コストと**製造領域コスト**の比率を
変化させて用途変換を考慮した部品循環
システムが成り立つ条件を検証する

5.3 各コスト比率が採算性に及ぼす影響

検証目的：解体領域コスト係数を変化させ用途変換を含んだ部品循環システムの採算性を評価

表8.コスト詳細

売上期待値：製造数(個)×60(万円)

コスト項目	コスト比率 (製造領域コスト：解体領域コスト)		
	(1：1)	(1：2)	...
リユースコスト	5	10	...
用途変換コスト	7	14	...
廃棄コスト	2	4	...
製品回収コスト	2	4	...
製品解体コスト	3	5	...
回収部品輸送コスト	5	10	...
回収部品在庫コスト	5	10	...
新造部品調達コスト	7	7	...
部品製造コスト	5	5	...
製品輸送コスト	5	5	...
部品在庫コスト	5	5	...
製品在庫コスト	7	7	...

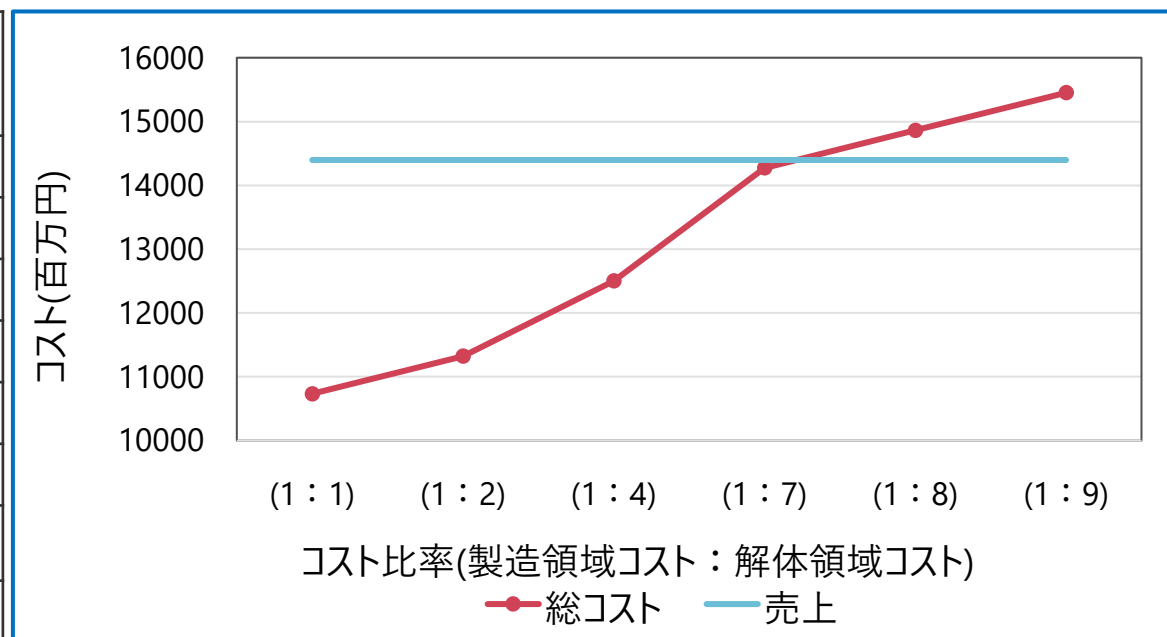


図7.コスト比率と売上期待値

解体領域コストが8倍以上かかる場合には、用途変換を考慮した部品循環型生産システムは成り立たない。

5.4 新造品調達コストと用途変換コスト比率が総コスト差に及ぼす影響

検証目的：用途変換を行う場合と行わない場合のモデルにおいて，新造品調達コスト
用途変換コストの比率の影響を検証

用途変換コストに対して新造品調達コストの係数を6段階に変化

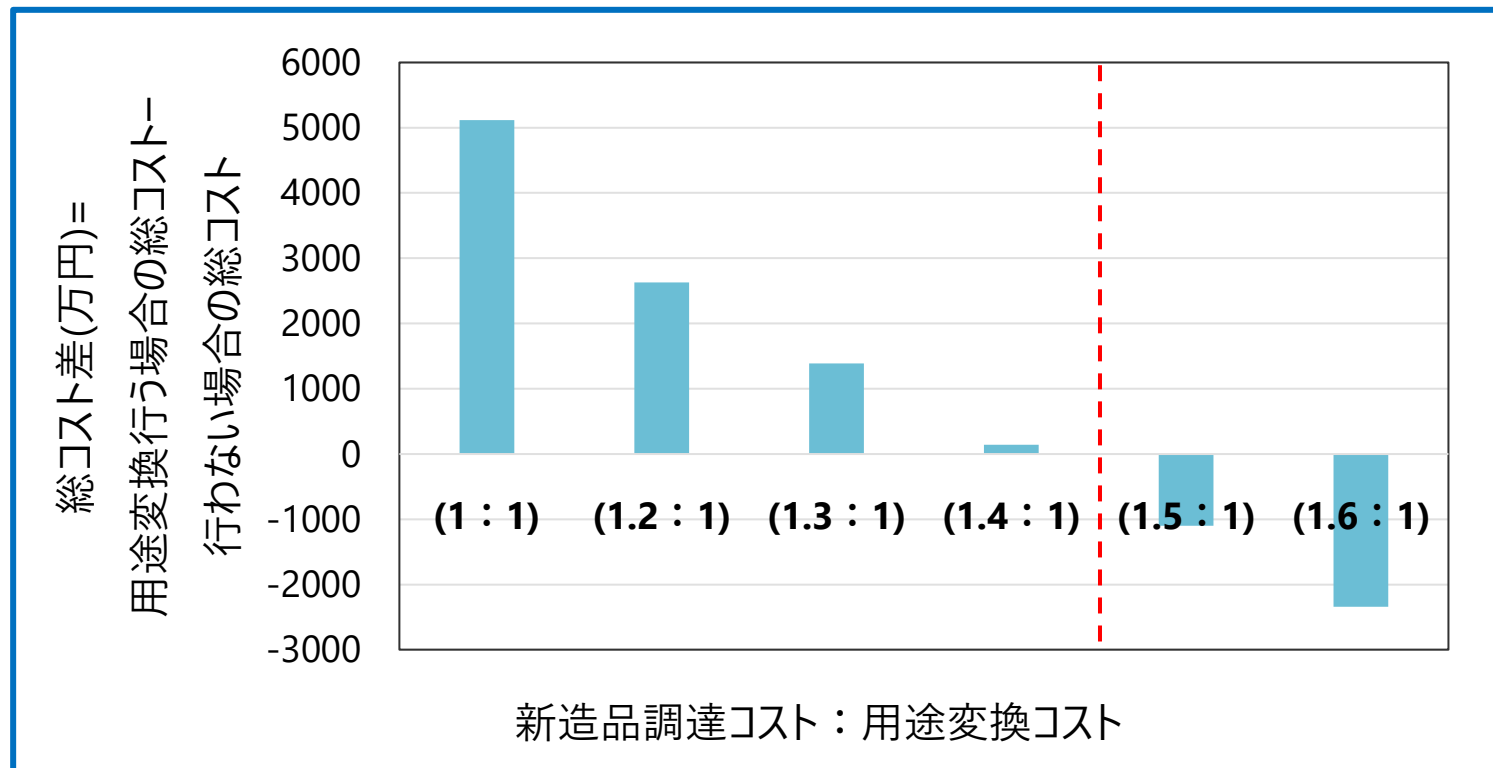


図8.新造品調達コストと用途変換コスト比率が総コスト差に及ぼす影響

新造品調達にかかるコストが1.5倍になると，コスト面と環境面とのトレードオフ関係は相殺される

6 まとめ

用途変換を考慮した部品循環システムを提案し、
有効性を評価できるシミュレータを作成した

□ 環境評価

用途変換を行うことで廃棄量及び新造量の削減見通しを評価できた

- 廃棄量削減(約66%減)
- 新造量削減(約4%減)

□ コスト評価

コスト係数を変動させることで採算性への影響を明らかにした

- 採算性の取れる解体領域と製造領域のコスト係数
- 用途変換が有効な新造品調達と用途変換品調達のコスト比率

参考文献

- [1]高田祥三, 浅井恵斗, 西田大, 多段階リユース管理方式の評価・改善のためのライフサイクルシミュレーションの開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.78-79 (2019)
- [2]松山祐樹, 松野智彦, 福重真一, 梅田靖, 多世代製品ライフサイクルの統合設計支援手法の提案, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, 第23巻, pp.2305-2312 (2013)
- [3]小原慎平, 柳在圭, 白石弘幸, 循環型生産システムの構築における運用コストを考慮した意思決定支援モデルの研究, 日本経営工学会論文誌, 第72巻, 第1号, pp.55-64 (2021)
- [4]浦野克哉, 高田祥三, モジュール組合せによる新造・再生を区別しないリマニュファクチャリング製品構成法, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.139-140 (2012)
- [5]糸山泰良, 高田祥三, メンテナンスとリユースを併用した空調設備機器のライフサイクル管理, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 1015-1016 (2009)
- [6]藤森浩一, 遠藤文誉, 三上享, 清水圭一, 吉田寿夫, 沓間隆秀, 環境に対する取組みと環境配慮型製品について, 日本画像学会誌, pp.48-56 (2011)
- [7]佐々治, 近藤伸亮, 梅田靖, 丸山則義, リユース設計のための限界リユース率評価手法の検討, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 467-468 (2004)
- [8]清水道悦, 小野田弘士, 次世代自動車用リチウムイオンバッテリーのリユース・リサイクルの構築, 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会, pp.201-202 (2019)

参考文献

- [9]藤田大智，奥村進，橋本宣慶，部品リユースを伴う循環型製品の生産計画に関する研究，精密工学会学術講演会公演論文集，pp. 795-796 (2018)
- [10] 瀬川昇，使用済み太陽光システムのリユースおよびリサイクル事業，廃棄物資源循環学会誌，第30巻，pp. 393-402 (2019)
- [11]中村優里，奥村進，橋本宣慶，環境配慮型製品におけるリユースユニットの物理寿命分布設計，精密工学会春季大会学術講演会公演論文集，pp. 601-602 (2019)
- [12]山崎裕貴，山本祐吾，吉田登，盛岡通，家電製品を事例とした部品リユース性の評価基準の策定と適用，土木学会，環境システム研究論文集 Vol.33，pp. 267-273 (2005)
- [13]村井健太，谷水義隆，西田太郎，中谷亮太，岩村幸治，杉村延広，循環型サプライチェーンにおけるリユースのための経済的回収モデルの提案，日本機械学会，生産システム部門研究発表会公演論文集，pp.6-7 (2016)
- [14]MIRAI-LABO株式会社，THE REBORN LIGHT，<https://mirai-lab.com/THEREBORNLIGHT/> (参照:2022-12-01)
- [15]日経クロステック，日産リーフの中古電池はどこへ行く？再利用にあの手この手，<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/04098/> (参照:2022-12-01)
- [16]池澤克就，赤坂 信悟，翁嘉華，用途変換を考慮した循環型サプライチェーンの課題とモデル化，日本経営工学会春季大会予稿集，pp.89-90 (2022)