

多製品への利用を考慮した リチウムイオンバッテリーの回収・再利用計画

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

研究者名 片山 颯太, 鈴木 裕之, 高橋 航貴

指導教官 翁 嘉華

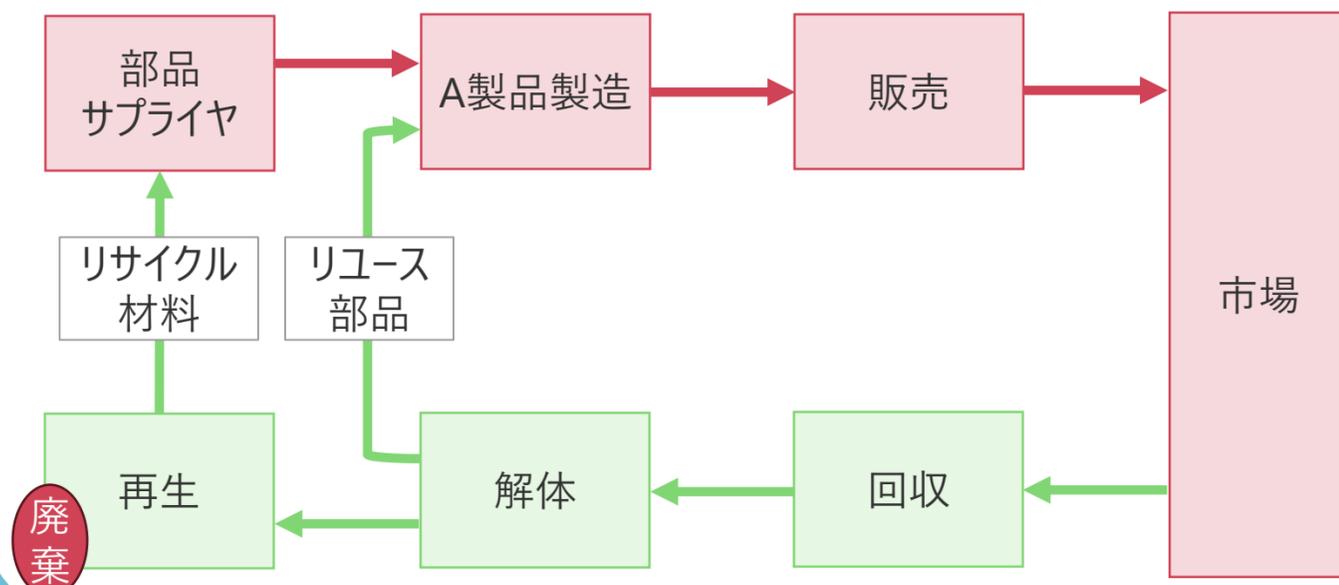
目次

- 研究背景と目的
- LiB モジュール回収・再利用問題の概要
- LiB モジュール回収・再利用問題の定式化
- 従来の再利用方式との比較検討
- 結論と今後の課題

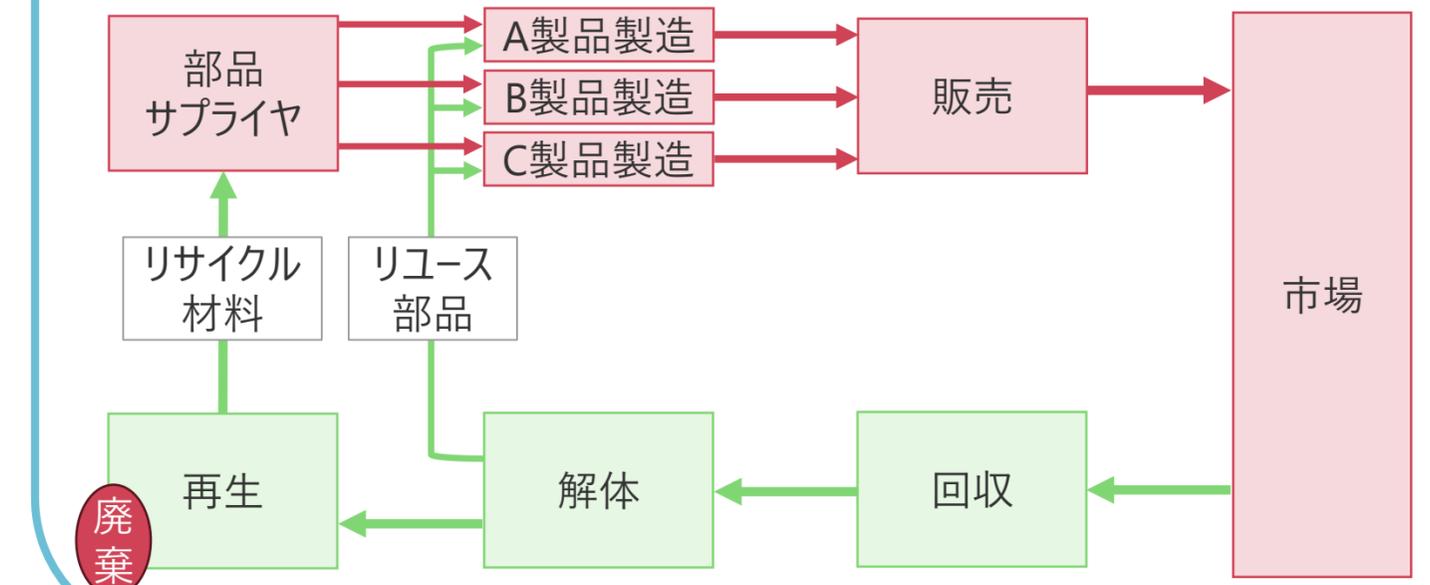
研究背景と目的

- EV需要拡大によるLiBの廃棄量増加が社会的な問題になっている[1].

- 同一製品カテゴリ内部部品循環システム[2]



- 多製品カテゴリ間部品循環システム[3]



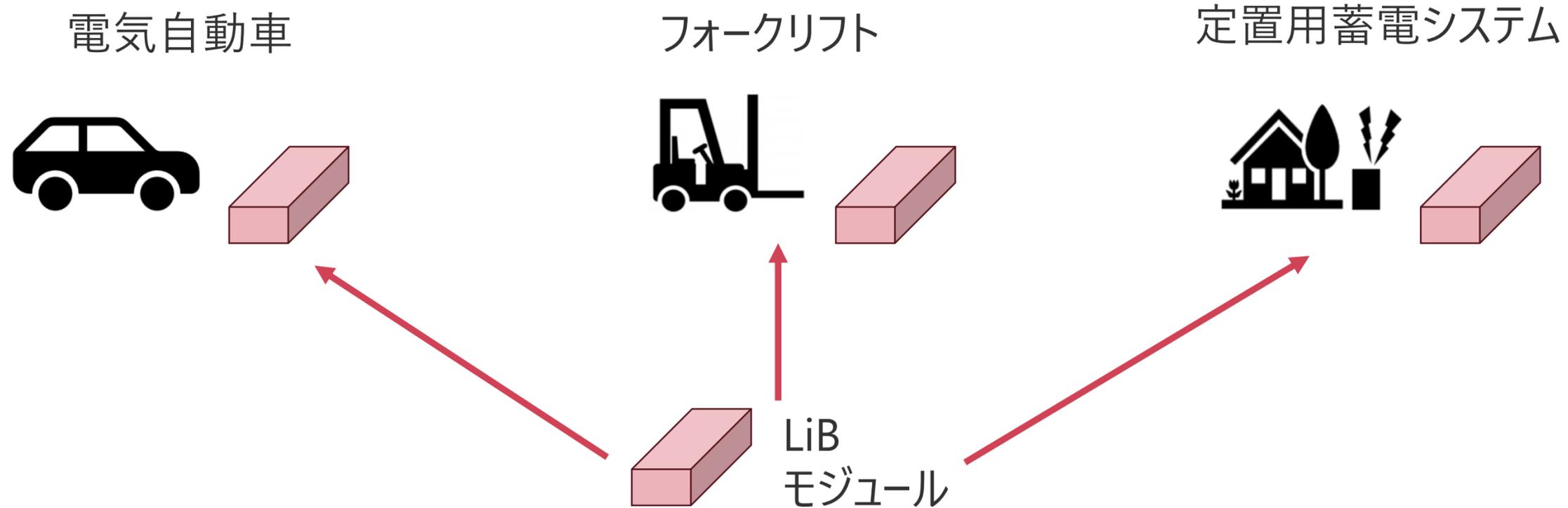
- 多製品カテゴリ間部品循環システムにおいて、LiBの生涯給電量の増加が確認されているが、部品の回収タイミングや再利用先製品の決定手段については改善の余地が残されている。

回収・再利用対象部品

□ 対象部品のLiBは複数の製品カテゴリで共通利用が可能である。

■対象部品 リチウムイオンバッテリー(LiB)

■対象製品 電気自動車/フォークリフト/定置用蓄電システム



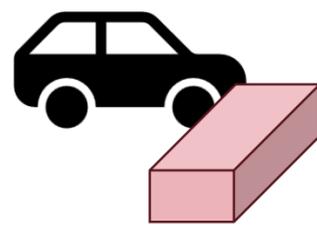
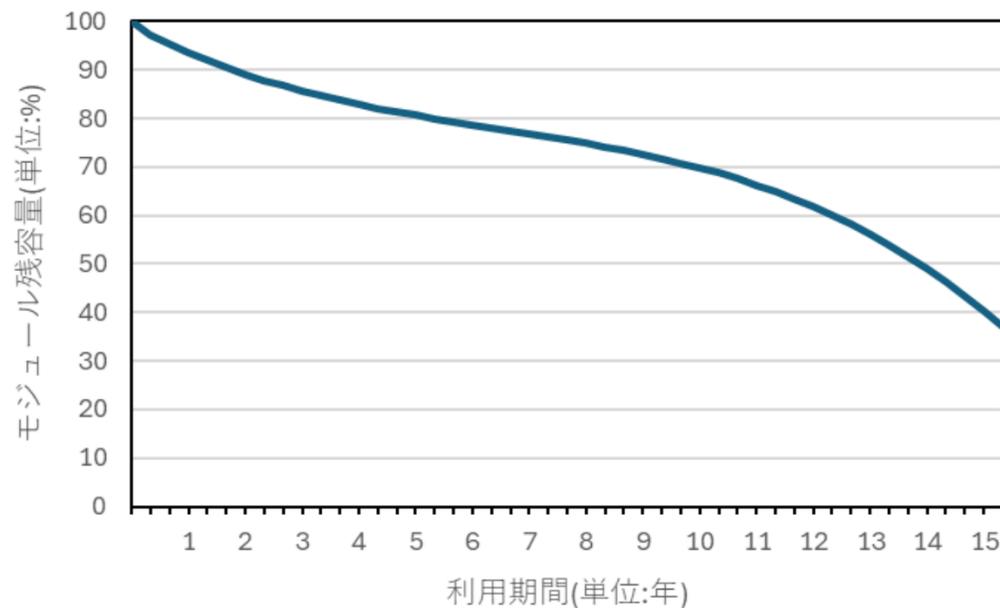
✓ 本研究では、複数製品カテゴリで共通利用されるLiBモジュールの回収・再利用を行う。

従来研究

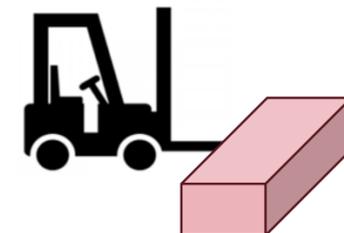
	研究テーマ	概要	製品カテゴリ		回収タイミング	
			単一	複数	固定	可変
1	安田豊「車載LiBクローズドループ・リサイクルの実現に向けて」精密工学会春季大会(2022)	LiBのクローズドループ運用モデル	○		○	
2	柳在圭「循環型生産システムにおける多目的意思決定支援モデルに関する研究」JIMA論文誌Vol.73,No.3(2022)	コスト・環境貢献の多目的意思決定	○		○	
3	池澤克就「循環型社会における生産・解体・再生計画方式」JIMA春季大会予稿集(2004)	リース複写機の需給調整、生産同期化	○		○	
4	柴崎敏典「インバース・マニファクチャリングを支える技術と部品リユース量の拡大」精密工学会春季大会(2020)	リユースを想定した共通化設計		○	○	
5	山田哲男「炭素税と経済連携協定を考慮したグローバルサプライ・再製造チェーンのIoTビジネスモデル構築」システム/情報/制御Vol.64,No10(2020)	炭素税を考慮した循環型ビジネスモデル		○	○	
6	Aoye Song "Advanced cycling ageing-driven circular economy with E-mobility-based energy sharing and lithium battery cascade utilisation in a district community" Journal of Cleaner Production(2023)	第一世代(EV)の電池を第二世代(蓄電池)として活用した循環方式		○	○	
7	本研究	複数製品カテゴリのリユース需給調整		○		○

LiBモジュール回収・再利用問題の概要

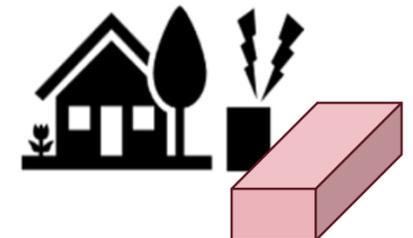
- モジュールは利用期間によって劣化していき、製品カテゴリごとに利用期間の制限がある。



電気自動車
利用期間上限：4年



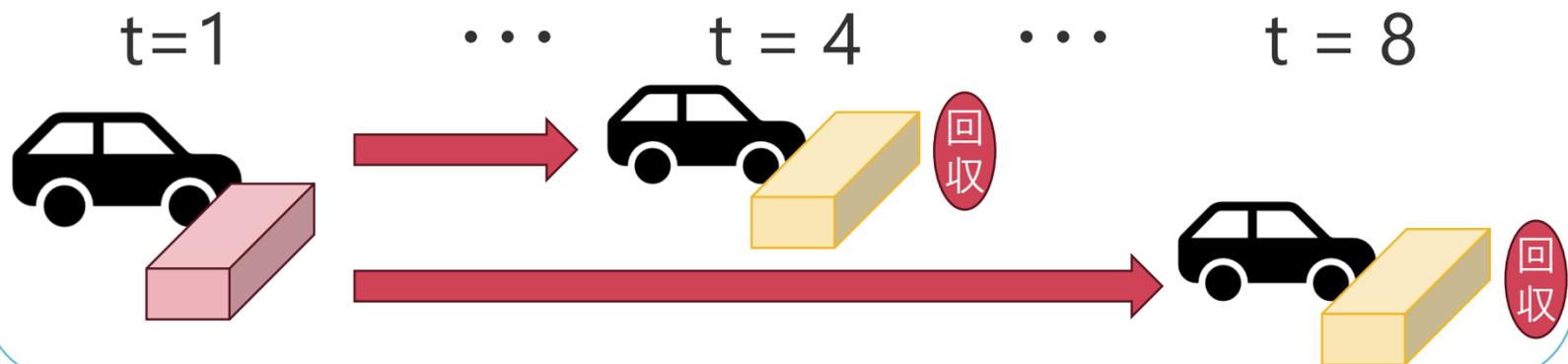
フォークリフト
利用期間上限：8年



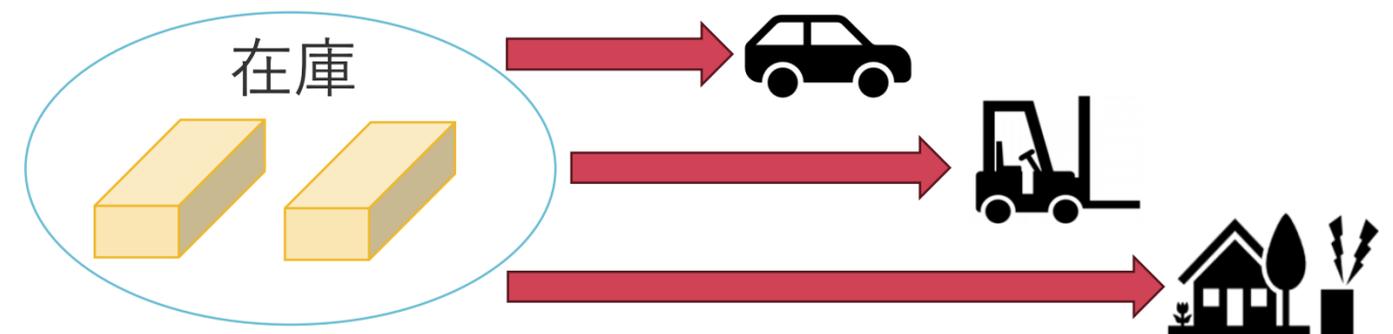
定置用蓄電システム
利用期間上限：15年

- 需要とモジュールの劣化状況を考慮して、製品の回収期及び再利用先製品を求める。

回収期の決定

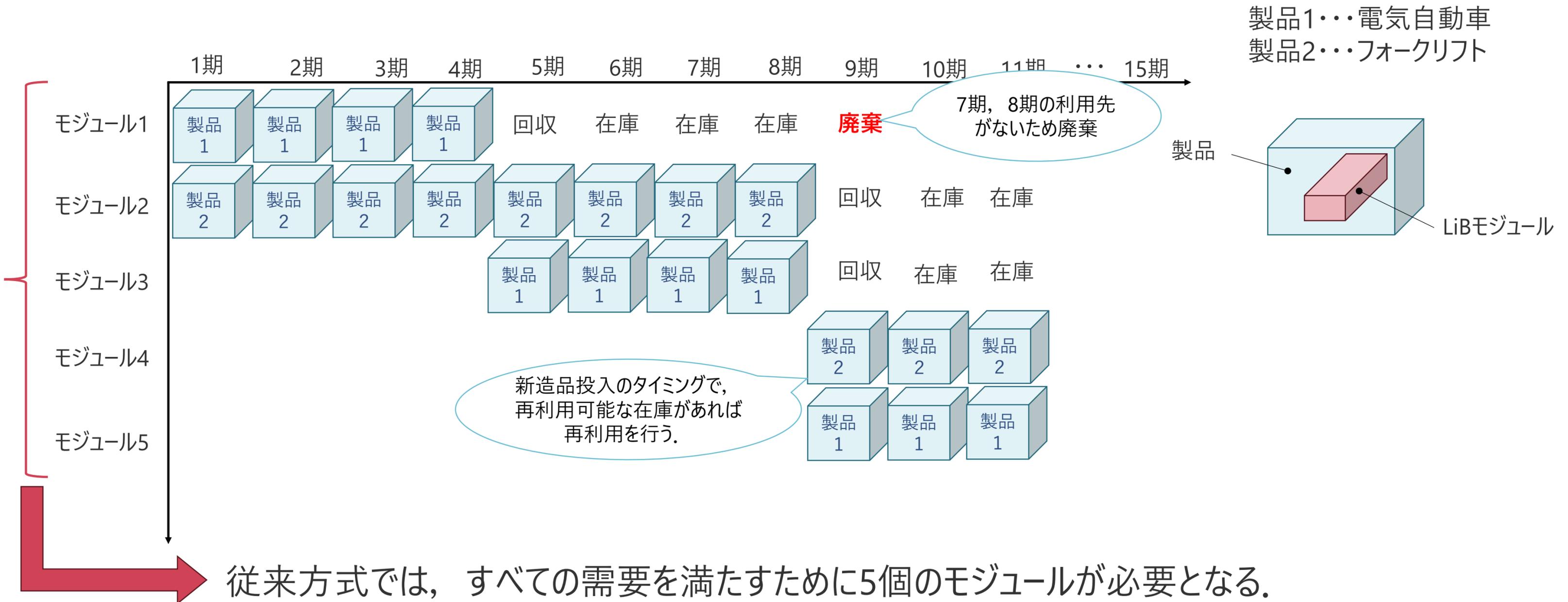


再利用先製品の決定



従来の再利用方式（2製品の例）

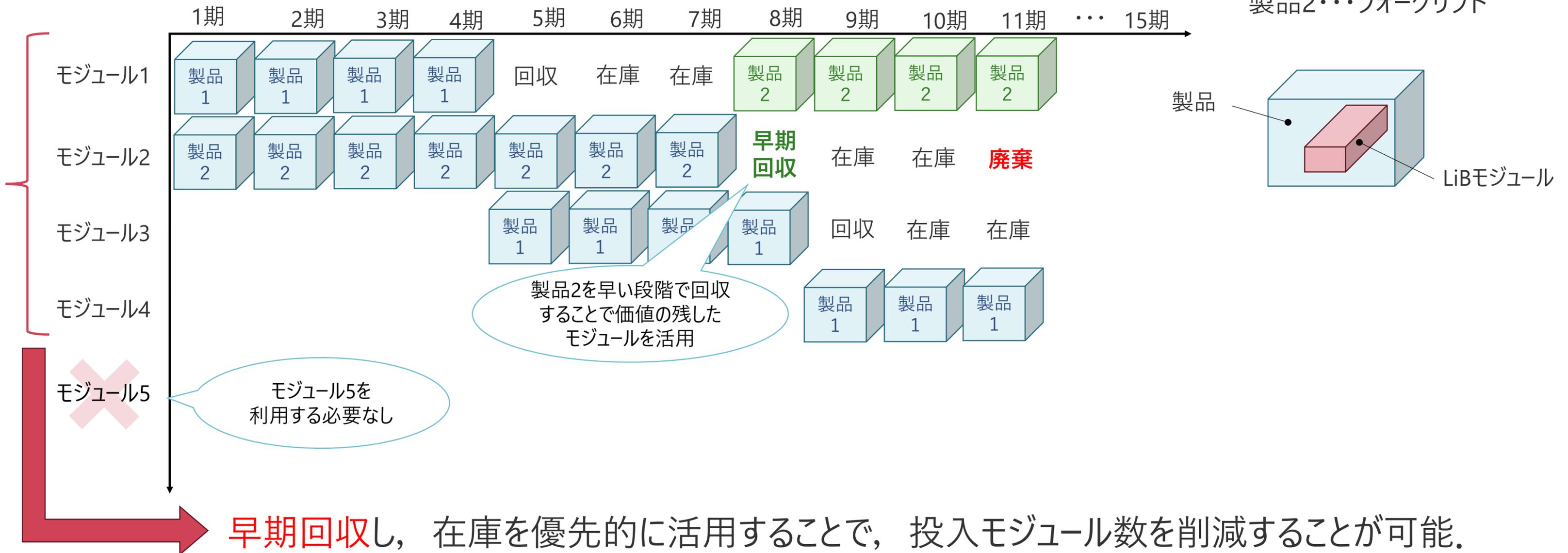
- 従来方式・・・需要に合わせた回収を行わず，要求容量を満たさなくなるまで利用する。



提案方式（2製品の例）

- 提案方式・・・需要に合わせた回収を行い，再利用先製品を決定することで投入モジュール数を削減する。

製品1・・・電気自動車
製品2・・・フォークリフト



変数の定義

- 本研究で扱う変数は以下とする。

変数	定義
i	モジュール番号 $i = \{1, 2, \dots, N_t\}$
t	期 $t = \{1, 2, \dots, 15\}$
j	製品番号 $j = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, TM_t\}$
c	製品カテゴリ番号 $c = \{1, 2, 3\}$
N_t	t 期のモジュール数
TM_t	t 期における3製品カテゴリ合計の製品数
R_c	製品カテゴリ c の利用期間上限
Q_j	製品 j の需要開始期

$j > 0$ は適用先製品番号を表す。
 $j = 0$ は製品に割りついていない状態を表す。
 $j = -1$ は回収し、メンテナンス在庫の期間であることを示す。
 $j = -2, -3, -4$ は利用可能在庫であることを示す。
 $j = -5$ はその期に廃棄されることを示す。

決定変数	定義
$B_{i,j}^t$	$\begin{cases} 1 & t\text{期に製品}j\text{にモジュール}i\text{が含まれている} \\ 0 & t\text{期に製品}j\text{にモジュール}i\text{が含まれない} \end{cases}$

決定変数

□ $B_{i,j}^t = \begin{cases} 1 & t\text{期に製品}j\text{にモジュール}i\text{が含まれている} \\ 0 & t\text{期に製品}j\text{にモジュール}i\text{が含まれない} \end{cases}$

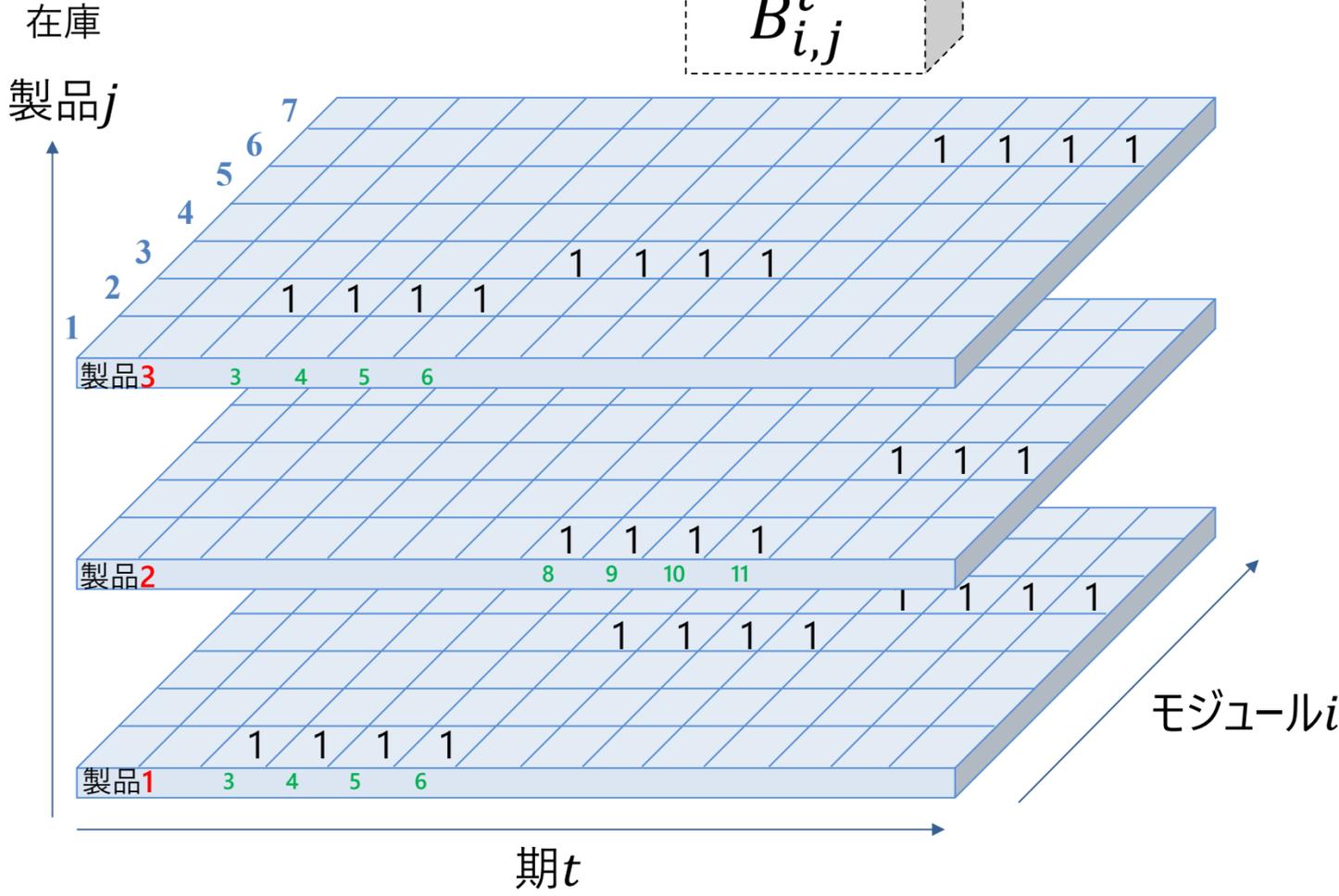
$j = 1$

$i \backslash t$	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	1	1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

その期に製品jを構成するモジュールiに1がたつ

全ての製品の利用状況を求める

$B_{i,j}^t$



制約条件①最低連続稼働期間

- 製品に適用されたモジュール i は適用してから2期(2年)は同一製品に割り当てられる。

- $t = 1$ の場合

$$B_{i,j}^1 = 1 \text{ のとき}$$

$$B_{i,j}^2 = B_{i,j}^1$$

製品 j の表 ($j > 0$)

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

- $t > 1$ の場合

$$B_{i,j}^t = 1 \wedge B_{i,j}^{t-1} = 0 \text{ のとき}$$

$$B_{i,j}^{t+1} = B_{i,j}^t, \quad \forall t > 1$$

製品 j の表 ($j > 0$)

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

制約条件②モジュール構成上限数

- 各モジュールが適用可能な製品は各期1つまでとする。

$$\sum_{j=1}^{TM_t} B_{i,j}^t = 1, \quad \forall i, \forall t$$

t 期のモジュール*i*は製品1で利用されているため、他の製品に利用できない。

		$j = 1$					$j = 2$					$j = 3$					$j = 4$						
$i \backslash t$	1	2	3	4	5	$i \backslash t$	1	2	3	4	5	$i \backslash t$	1	2	3	4	5	$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0					1	0					1	0					1	0				
2	1					2	0					2	0					2	0				
3	0					3	0					3	0					3	0				
4	0					4	0					4	0					4	0				
5	0					5	0					5	0					5	0				

制約条件③モジュール割当上限数

- 各期各モジュールが割り当てられる製品は1つ。

$$\sum_{i=1}^{N_t} B_{i,j}^t \leq 1, \quad \forall t, \forall j > 0$$

製品*j*の表(*j* > 0)

<i>i</i> \ <i>t</i>	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0
3	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

各製品, その期に利用できるモジュールは1つまで
(列合計)

需要発生前は製品の利用が始まっていないので
モジュール数は0

制約条件④利用期間上限制約

- 製品カテゴリごとに設定された利用期間上限は超えない

$$\sum_{j=1}^{TM_t} \sum_{t=1}^n B_{i,j}^t \leq R_c, \quad \forall i$$

製品12...カテゴリ3(定置用蓄電システム)

$$R_3 = 15$$

1期からn = 5期までのモジュールi = 2の利用期間

$$\sum_{j=1}^{TM_t} \sum_{t=1}^5 B_{2,j}^t = 4$$

$$\left(\sum_{j=1}^{TM_t} \sum_{t=1}^5 B_{2,j}^t \right) \leq R_3 \text{を満たす}$$

j = 1

i \ t	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

j = 2, ...,

j = 12

i \ t	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0

制約条件⑤ 需要制約

- 利用開始期以降，すべての期において製品利用が途絶えることはない。

- $t < Q_j$ の場合

$$\sum_{i=1}^{N_t} B_{i,j}^t = 0, \quad \forall t < Q_j, \forall j$$

$j = 3, \quad Q_j = 2$

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	0
5	0	0	0	0	1

需要発生前は，製品に対してモジュールの割り当ては行われない。

- $t \geq Q_j$ の場合

$$\sum_{i=1}^{N_t} B_{i,j}^t \geq \sum_{i=1}^{N_t} B_{i,j}^{t-1}, \quad \forall t \geq Q_j, \forall j$$

$j = 3, \quad Q_j = 2$

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	0
5	0	0	0	0	1

需要発生後は，モジュールの割り当てが途切れない

制約条件⑥在庫制約

- $B_{i,-1}^t = 1$ (回収) であれば $t + 1 \sim t + 4$ 期にとりうる $B_{i,j}^t$ の値がいずれかのパターンになる。

$B_{i,-1}^t = 1$ の時, 以下のいずれかが成立する。

$$\sum_{j=1}^{TM_t} B_{i,j}^{t+1} = 1$$

または

$$B_{i,-2}^{t+1} = 1 \wedge \sum_{j=1}^{TM_t} B_{i,j}^{t+2} = 1$$

または

$$B_{i,-2}^{t+1} = 1 \wedge B_{i,-3}^{t+2} = 1 \wedge \sum_{j=1}^{TM_t} B_{i,j}^{t+3} = 1$$

または

$$B_{i,-2}^{t+1} = 1 \wedge B_{i,-3}^{t+2} = 1 \wedge B_{i,-4}^{t+3} = 1 \wedge B_{i,-5}^{t+4} = 1$$

	t	$t + 1$	$t + 2$	$t + 3$	$t + 4$
パターン1	回収 ($j = -1$)	再利用 ($j > 0$)			
パターン2	回収 ($j = -1$)	在庫 ($j = -2$)	再利用 ($j > 0$)		
パターン3	回収 ($j = -1$)	在庫 ($j = -2$)	在庫 ($j = -3$)	再利用 ($j > 0$)	
パターン4	回収 ($j = -1$)	在庫 ($j = -2$)	在庫 ($j = -3$)	在庫 ($j = -4$)	廃棄 ($j = -5$)

回収後, 最長3期間利用可能な在庫として保持する。

3期間利用がなかった在庫は次の期に廃棄する。

評価関数

- モジュール運用計画を評価するために、対象期間のモジュール生産数の最小化を目的関数とする。

$$\min. M_i, \quad M_i = \begin{cases} 1 & \sum_{j=1}^{TM_t} \sum_{t=1}^{15} B_{i,j}^t > 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^{TM_t} \sum_{t=1}^{15} B_{i,j}^t = 0 \end{cases}$$

全ての製品で一度でもモジュール*i*を利用していたら $M_i = 1$ となる

$j = 1$

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	0	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0

$j = 2, \dots, j = 12$

$i \backslash t$	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	1	1	0	0



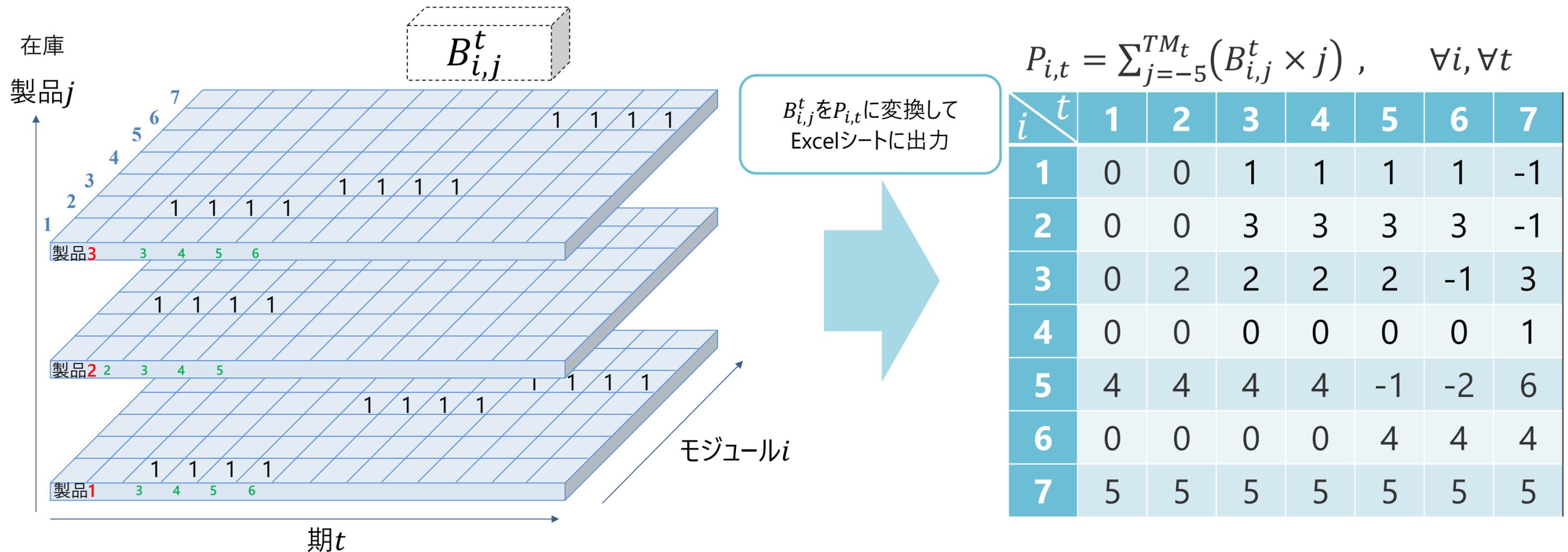
i	M_i
1	0
2	1
3	1
4	0
5	1

モデル実装

- 対象問題にNuorium Optimizerを活用することで、最適なLiB運用計画を作成する。

計算環境 (PC)

CPU: Intel Xeon 12-Core w5-2455X 3.2GHz Memory: 64 GB (16GB × 4) DDR5-4800



実験結果

□ 3製品9台（EV3台，FL3台，蓄電システム3台），期間15期において検証を行う。

出力結果($P_{i,t}, M_i, \min M_i$)

$i \backslash t$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	モジュールID	利用フラグ
1	1	1	1	1	-1	3	3	3	3	-1	-2	6	6	6	6	1	1
2			2	2	2	2	2	2	2	-1	-2	-3	-4	-5		2	1
3		3	3	3	3	-1	8	8	8	8	-1	-2	9	9	9	3	1
4			4	4	4	4	-1	5	5	5	5	-1	-2	-3	-4	4	1
5	5	5	5	5	5	5	5	-1	9	9	9	9	-1	3	3	5	1
6				6	6	6	6	-1	-2	-3	8	8	8	8	-1	6	1
7				7	7	7	7	-1	-2	-3	-4	-5				7	1
8		8	8	8	8	8	-1	6	6	6	6	-1	-2	-3	-4	8	1
9	9	9	9	9	9	9	9	9	-1	3	3	3	3	-1	-2	9	1
10															4	10	1
11																11	0
12									1	1	1	1	-1	-2	8	12	1
13																13	0
14							4	4	4	4	-1	5	5	5	5	14	1
15					1	1	1	1	-1	2	2	2	2	-1	-2	15	1
16														1	1	16	1
17																17	0
18												7	7	7	7	18	1
19											4	4	4	4	-1	19	1
20								7	7	7	7	-1	-2	2	2	20	1

新造モジュール数	17
廃棄モジュール数	2

入力情報($j, c, Q_j, R_c, span$)

製品ID	製品カテゴリ	需要開始期	製品カテゴリ	利用期間
1	1	1	1	4
2	2	3	2	8
3	3	2	3	15
4	1	3		
5	2	1		
6	3	4		
7	1	4		
8	2	2		
9	3	1		

最低連続稼働期間	4
----------	---

- 全て新造品を利用する組み合わせに比べて9台で3個のLiBモジュールを削減。

この結果を参照

- 関東圏のEV/PHEVの普及台数202,236台を再利用の対象に想定[9].
- LiBモジュール(40kWh)の製造費476,000円/個[10]

換算

- ✓ 全て新造品に比べ，15年で67,412個，約321億円の節約効果が見込める。

従来の再利用方式との比較検証

- 従来方式・・・需要に合わせた回収を行わず，要求容量を満たさなくなるまで利用する。

LiB運用計画(従来方式)

$i \backslash t$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	モジュールID	利用フラグ
1	1	1	1	1	-1	-2	-3	-4	-5							1	1
2					1	1	1	1	-1	-2	2	2	2	2	-1	2	1
3									1	1	1	1	-1	-2	2	3	1
4													1	1	1	4	1
5			2	2	2	2	2	2	2	2	-1	-2	-3	-4	-5	5	1
6																6	0
7		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	1
8			4	4	4	4	-1	-2	5	5	5	5	-1	-2	-3	8	1
9							4	4	4	4	-1	-2	5	5	5	9	1
10										4	4	4	4	-1		10	1
11															4	11	1
12	5	5	5	5	5	5	5	5	-1	-2	-3	-4	-5			12	1
13																13	0
14				6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	14	1
15				7	7	7	7	-1	-2	8	8	8	8	-1	-2	15	1
16							7	7	7	7	-1	-2	8	8		16	1
17											7	7	7	7		17	1
18		8	8	8	8	8	8	8	8	-1	-2	-3	-4	-5		18	1
19																19	0
20	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	20	1

新造モジュール数	17
廃棄モジュール数	4

入力情報($j, c, Q_j, R_c, span$)

製品ID	製品カテゴリ	需要開始期	製品カテゴリ	利用期間
1	1	1	1	4
2	2	3	2	8
3	3	2	3	15
4	1	3		
5	2	1		
6	3	4		
7	1	4		
8	2	2		
9	3	1		

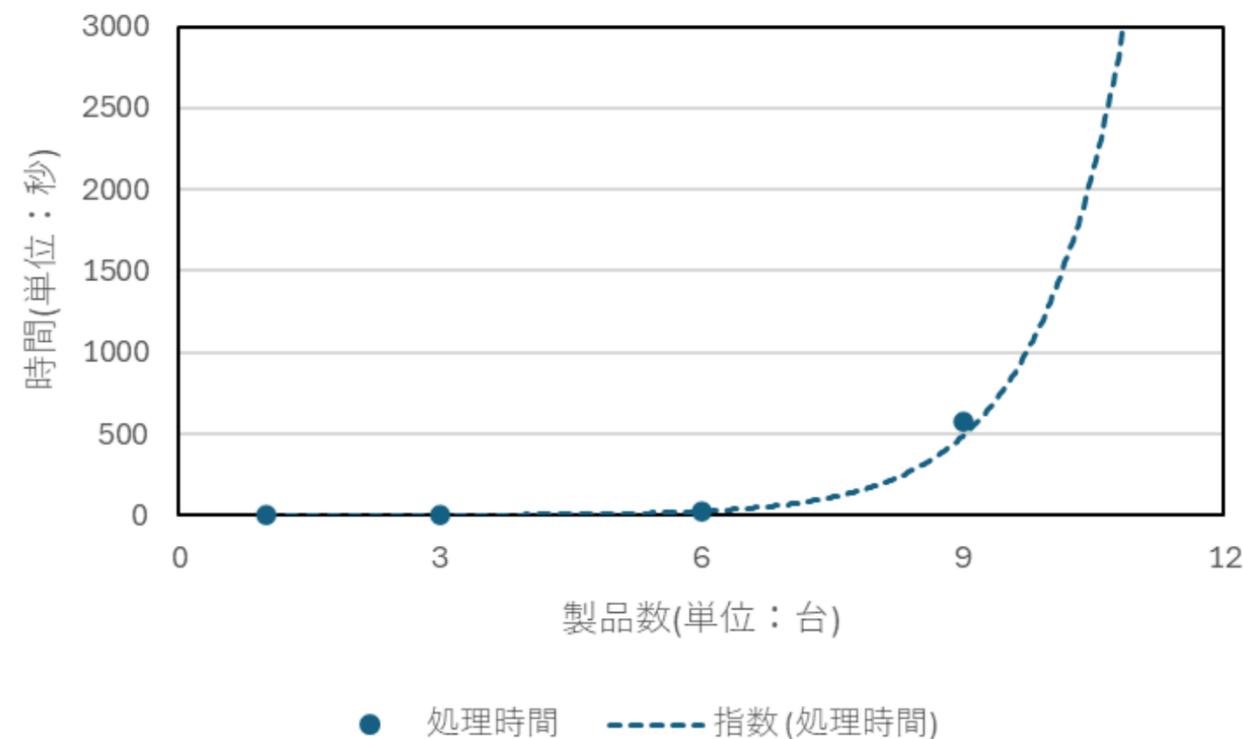
最低連続稼働期間	4
----------	---

比較項目	従来方式	提案方式
新造モジュール数	17	17
廃棄モジュール数	4	2

- ✓ 対象問題の規模の小ささから，目的関数値（新造モジュール数）では差が見られなかった。
- ✓ 需要に合わせた回収を行い，価値の残した在庫の積極的な活用から，廃棄モジュール数の削減が確認された。

計算時間

□ 製品数が増加すると、組み合わせの数が急増し、処理時間が大幅に増える。



製品数 TM_t	1	3	6	9	12
処理時間(秒)	0.26	0.96	22.65	577.59	3日間
モジュール数 N_i	4	6	12	17	計算中

組み合わせ数の推移 $\rightarrow 2^{N_i \times 15 \times (TM_t + 6)}$

- ・製品数1 ($j = \{-5, -4, \dots, -1, 0, 1\}$) $\dots 2^{420}$
- ・製品数3 ($j = \{-5, -4, \dots, -1, 0, 1, 2, 3\}$) $\dots 2^{945}$
- ・製品数6 ($j = \{-5, -4, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, 6\}$) $\dots 2^{2520}$
- ・製品数9 ($j = \{-5, -4, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, 9\}$) $\dots 2^{4500}$
- ・製品数12 ($j = \{-5, -4, \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, 12\}$) $\dots 2^{7290}$

結論と今後の課題

- 本研究では、多製品を対象としたLiBの回収及び再利用計画作成方法を提案し、数理最適化の枠組みを適用することで、最適な計画策定システムを構築した。
- LiB運用計画を3つの製品カテゴリ、計画期間15期の問題に適用した結果、必要モジュール数を削減し、従来の再利用方式と比べ廃棄モジュール数の削減を確認した。
- 今後の課題として、LiBの給電量や運用コストを考慮したLiBの回収及び再利用計画作成方法の提案が挙げられる。
- 計算時間を短縮するための定式化の工夫が求められる。

参考文献

- [1] 矢野経済研究所, リチウムイオン電池劣化診断機器／サービス市場の現状と展望, 矢野経済研究所, p.33 (2024)
- [2] 柳在圭, 白石弘幸, 権莉淵, 清水良明, 循環型生産システムにおける多目的意思決定支援モデルに関する研究, 日本経営工学会論文誌, Vol. 73, No.3, pp. 177-188 (2022)
- [3] 池澤克就, 赤坂信悟, 翁嘉華, 多製品循環型サプライチェーンにおける需給調整方式, 日本機械学会2024年度年次大会, S141-04(2024)
- [4] 安田豊, 車載LiBクロースドループ・リサイクルの実現に向けて, 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1-2 (2022)
- [5] 池澤克就, 野本多津, 弘重雄三, 五十嵐健, 循環型社会における生産・解体・再生計画方式, 日本経営工学会平成16年度春季大会予稿集, pp.84-85 (2009)
- [6] 柴崎敏典, インバース・マニファクチャリングを支える技術と部品リユース量の拡大, 2020年度精密工学会春季大会, pp.313-314(2020)
- [7] 山田哲男, 木下雄貴, 長沢敬祐, 山田周歩, 井上全人, 北田皓嗣, 石垣綾, 炭素税と経済連携協定を考慮したグローバルサプライ・再製造チェーンのIoTビジネスモデル構築, システム制御情報学会誌, Vol.64, No.10, pp.394-402(2020)
- [8] Aoye Song and Yuekuan Zhou , Advanced cycling ageing-driven circular economy with E-mobility-based energy sharing and lithium battery cascade utilisation in a district community , Journal of Cleaner Production , vol.415 , Article no. 137797(2023) , DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137797>
- [9] ミライズエネチェンジ株式会社, 【2025年最新】都道府県別の電気自動車（EV）普及状況。人口当たり普及台数は岐阜県が67.3台で1位, <https://ev-charge-enechange.jp/articles/006/> (参照日2025-11-20)
- [10] 科学技術振興機構, 低炭素社会戦略センター, 蓄電池システム一次世代電極活物質を用いたリチウムイオン電池の製造コスト試算—, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, Vol.9, pp.1-15 (2021)