

アルミ車両の水平リサイクル推進委員会報告

「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による
省エネ実証事業 (NEDO事業2016～2018年度)

2019年6月
(一社)日本アルミニウム協会
アルミ車両の水平リサイクル推進委員会

目次



1. リサイクル関連の国プロの経緯
2. 「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業の実施体制
3. 「アルミ車両の水平リサイクル推進委員会」
 - 3.1 構成メンバー
 - 3.2 水平リサイクル推進委員会開催履歴
4. 溶解・鋳造および材料試験
 - 4.1 一次溶解試験
 - 4.2 二次溶解（鋳造）・押出試験
 - 4.3 材料試験
 - 4.4 まとめ
5. 規格の検討（プロセス認証、再生材アルミニウム合金）
 - 5.1 規格名
 - 5.2 適用範囲
 - 5.3 要旨
 - 5.4 LIBSソーティングプロセス認証
 - 5.5 LIBSソーティング再生材アルミニウム合金
 - 5.6 処理フロー
6. まとめ

1. リサイクル関連の国プロの経緯

2009年度（NEDO事前研究）

2010～2012年度（NEDO実用化開発）

- ・X線によるスクラップ選別
- ・サッシtoサッシを可能にするスクラップ選別の実用化

<課題>

X線ではアルミ合金5000系（AL-Mg）と6000系（AL-Mg-Si）の選別ができない

⇒自動車や鉄道車両への実用化が困難

2014～2015年度（経産省実証事業）

- ・※LIBSソーティングラインの完成
- ・東京メトロ殿の廃車両をモデルにLIBS選別のリサイクル事業性

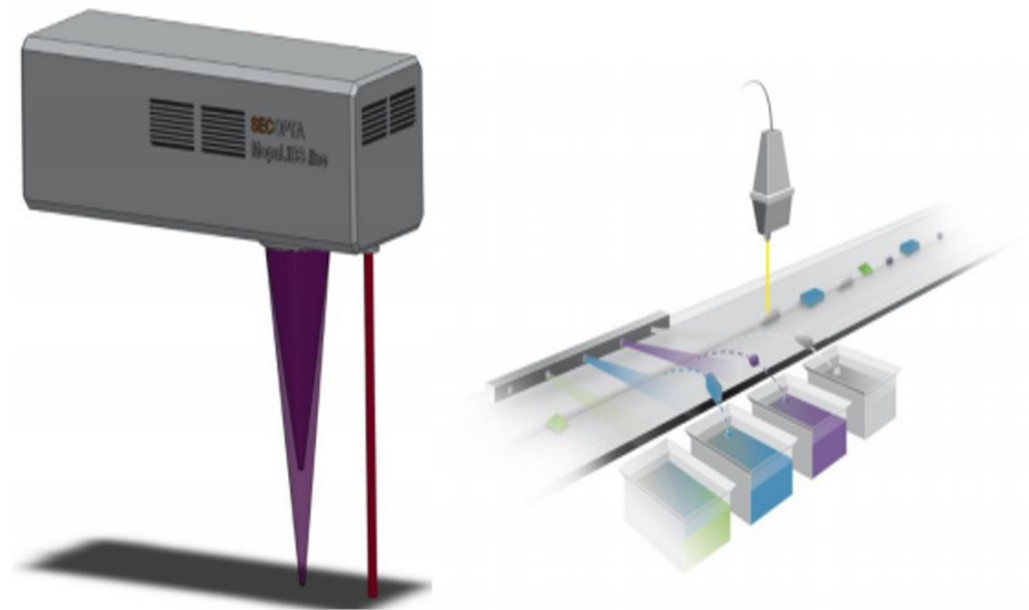
2016～2018年度（NEDO事業）

「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業

- ・※LIBSソーティングの実用性向上の設備改善
- ・アルミ鉄道車両材をモデルに水平リサイクルの仕組みを構築する。
⇒アルミ協会内に「アルミ車両の水平リサイクル推進委員会」を設置

※LIBSソーティングのイメージ図

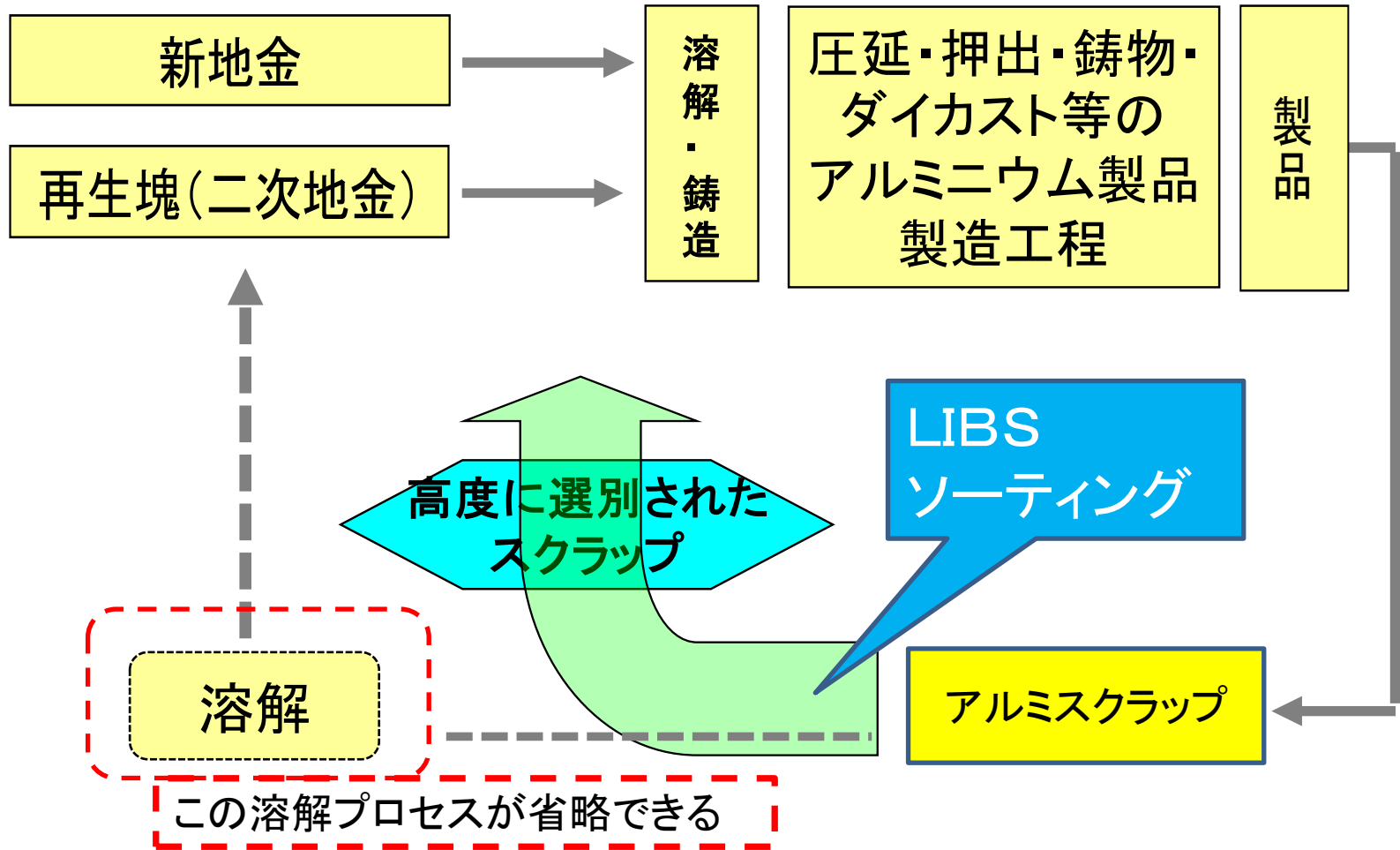
高出力パルスレーザーを試料に集光照射した際生成されるプラズマをスペクトル解析し、試料に含まれる元素を組成判別（主成分と含有元素）する



※Laser Induced Breakdown Spectroscopy、レーザー誘起ブレイクダウン分光

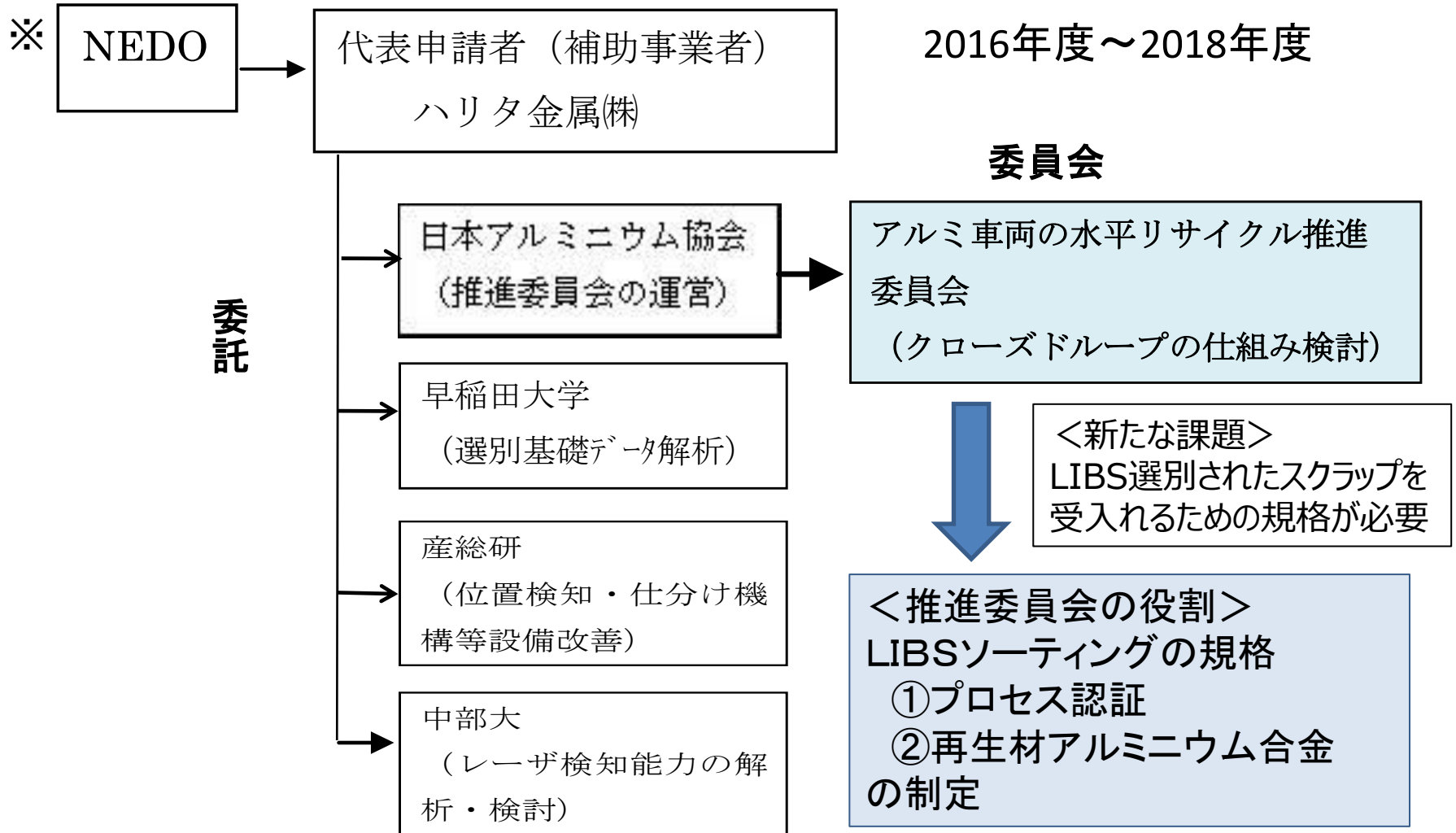
※LIBSソーティングの狙い

従来、アルミスクラップはアルミ合金が混合されているため、溶解して成分を調べ、鋳物系にカスケードリサイクルされていた。そこで、レーザーにより合金別（高度）に選別することで、溶解せずに同一合金に水平リサイクルが可能になる。



※Laser Induced Breakdown Spectroscopy、レーザー誘起ブレークダウン分光

2. 「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による 省エネ実証事業の実施体制



※「アジア省エネルギー型資源循環制度導入実証事業」
テーマ「動静脈一体車両リサイクルシステム」の実現による省エネ実証事業

3. 「アルミ車両の水平リサイクル推進委員会」

3.1 構成メンバー

N E D O事業委託	早稲田大学（委員長） 中部大学 国立研究開発法人産業技術総合研究所 （一社）日本アルミニウム協会
鉄道事業者	東海旅客鉄道(株)、東京地下鉄(株) 東日本旅客鉄道(株)
鉄道車両メーカー	川崎重工業(株)、近畿車輛(株) 日本車輛製造(株)、(株)日立製作所
リサイクル事業者	日軽エムシーアルミ(株) ハリタ金属(株)
アルミ車両材メーカー	(株)神戸製鋼所、三協立山(株) 昭和電工(株)、日本軽金属(株) 三菱アルミニウム(株)、(株)U A C J
自動車メーカー （オブザーバー）	トヨタ自動車(株)、日産自動車(株) (株)本田技術研究所

3.2 水平リサイクル推進委員会開催履歴

- ・第1回委員会 2016年8月4日開催
- ・第2回委員会 2016年10月14日開催
- ・第3回委員会 2016年12月8日開催
- ・第4回委員会 2017年2月13日開催
- ・溶解鋳造工程見学（日本軽金属）
2017年3月13日開催
- ・第5回委員会 2017年4月25日開催
- ・第6回委員会 2017年7月12日開催
- ・第7回委員会 2017年9月12日開催
- ・第8回委員会 2017年12月15日開催
- ・第9回委員会 2018年3月20日開催
- ・第10回委員会 2018年5月31日開催
- ・第11回委員会 2018年7月26日開催
- ・第12回委員会 2018年10月3日開催
- ・第13回委員会 2018年12月3日開催
- ・第14回委員会 2019年2月7日開催



4 溶解・鋳造および材料試験

規格を検討する上で、LIBS選別された材料の溶解・鋳造および材料試験を実施し、評価を行った。実施手順は以下の通り。

工 程	内 容
① LIBS選別試験 (ハリタ金属)	① 豎型破碎後の銀座線車両アルミ片についてLIBS選別試験。5000、6000、7000系のアルミ試料を回収。
② 一次溶解試験	② ①で回収した5000系、6000系、7000系アルミ試料について、坩堝または回転溶解炉に投入してインゴットを鋳造。インゴットの成分分析を実施し、合金規格に適しているかの検証を行う。
③ 二次溶解（鋳造） 試験	③ ②で鋳造したアルミ試料を溶解してビレットを製造。二次溶解の際に、ビレット鋳造に必要な量まで新地金や母合金を添加し、成分調整を実施。
④ 押出試験	④ ③で製造したビレットを押出機で押し出す。押出試験の比較対象として、過去の大型薄肉型材用アルミニウム合金6N01-T5データを採用する。
⑤ 材料試験	⑤ ④の押出材について、外観観察や組織観察、機械的強度や疲労試験を行う。

4.1 一次溶解試験(1)

【5000系・7000系アルミ】

試験日時：2018年2月20日（6:00～16:30）

溶解試験場所：M社

試験方法：坩堝投入による小バッチ試験×4回（5000系アルミ・7000系アルミ試料を、各々枕梁あり・なしで分けて）実施。
溶解後のアルミ合金サンプルよりテストピースを採取。日軽エムシーアルミで分析試験行い評価。



溶解前



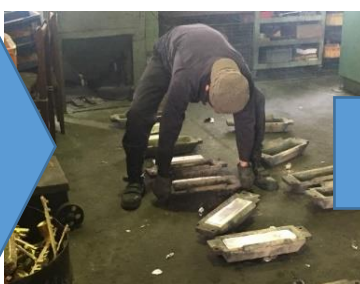
坩堝へ手投入（投入量：約40kg/1回）。



随時、坩堝の中をかき混ぜ、灰を除去。



溶解後、アルミを型枠へ流し込む。



冷却後、試料を回収



溶解後アルミ試料

銀座線車両5000系アルミ（枕梁なし）溶解風景

4.1 一次溶解試験(2)

【6000系アルミ】

試験日時：2018年2月23日（10：00～15：00）

溶解試験場所：日軽エムシーアルミ株式会社三重工場（三重県伊賀市佐那具町1736）

試験方法：5t回転炉によるバッチ溶解×2回（6000系アルミを枕梁あり・なしで分けて）実施。溶解後のアルミ合金サンプルよりテストピースを採取し、日軽エムシーアルミで分析試験を行い評価。



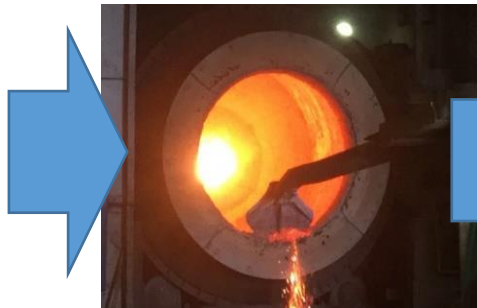
溶解前



リフトで試料を投入。



溶解開始直後



溶解が進んだら灰を除去。



溶解後、アルミを回収。



溶解後アルミ試料

銀座線車両6000系アルミ（枕梁なし）溶解風景

4.1 一次溶解試験(3)

成分分析結果

		Cu	Si	Fe	Zn	Mg	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Cd
5000系	枕梁あり	0.039	0.182	0.464	0.058	3.709	0.471	0.007	0.023	0.0028	0.002	0.116	<0.0001
	枕梁なし	0.042	0.222	0.411	0.050	3.778	0.437	0.009	0.024	0.0029	0.002	0.117	<0.0001
6000系	枕梁あり	0.069	0.520	0.198	0.015	0.491	0.099	0.004	0.017	0.0027	0.001	0.036	<0.0001
	枕梁なし	0.079	0.551	0.206	0.023	0.483	0.111	0.004	0.018	0.0027	0.001	0.040	<0.0001
7000系	枕梁あり	0.133	0.180	1.045	3.726	1.220	0.340	<0.004	0.034	0.0045	0.005	0.117	<0.0001
	枕梁なし	0.118	0.173	0.409	3.559	1.180	0.313	<0.001	0.047	0.0033	0.003	0.108	<0.0001

溶解試験アルミ試料成分分析結果
 (日軽エムシーアルミ(株)実施の成分分析結果より、平均値を抜粋)

(wt%)

- 6000系アルミ試料について、枕梁ありはA6N01およびA6063規格のJIS規格の基準を概ねクリアすることができた。一方、枕梁なしについては、A6063のJIS規格に対してMn値がわずかに上限を超える結果となった。(希釈利用では問題の無いレベルと考えられる)
- 5000系アルミ試料、7000系アルミ試料も2次材料として利用可能と考えられる。

4.2 二次溶解(鑄造)・押出試験(1)

【鑄造・押出試験(6000系アルミ)】 — 銀座線車両解体物由来アルミインゴット出荷風景
鑄造・押出試験を日本軽金属(株)蒲原製造所で実施した。



出荷材料：6000系アルミインゴット
(銀座線車両解体物由来・
2018年2月23日 日軽エムシーアル
ミ熔融済み)
合計重量：1,254kg

出荷中風景

出荷完了風景

出荷日：2018年6月11日
出荷先：日軽物流蒲原支店蒲原営業所

4.2 二次溶解(鋳造)・押出試験(2)

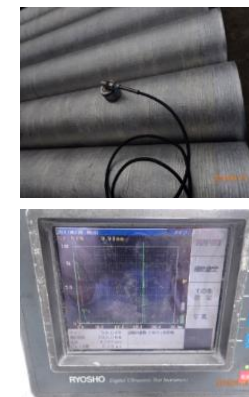
【鋳造試験】①

- ・鋳造・押出試験の比較対象として、過去の大型薄肉形材用アルミニウム合金6N01-T5データ（軽金属車両委員会6N01-T5疲れ試験分科会）を採用。
- ・押出用ビレット鋳造設備：日本軽金属(株)蒲原製造所 グループ素材センター F30 5トン溶解・保持炉
⇒インライン脱ガス装置、CFFろ過フィルター⇒DC30型半連続鋳造機
- ・ビレット用原材料：ビレット鋳造に必要量が3トンのため、6000系アルミインゴット（車両スクラップ）約2トンに、新塊（AL純度99.7%）を約1トン、元の組成の成分調整として母合金約50kgを投入
⇒**リサイクル材料比率は約7割**
- ・ビレット仕様：直径φ203mm
×鋳込み長さ約2m×8本

鋳造時の状況	異常なし
外観観察	一般的な水準
超音波探傷	ビレット中心部の鋳造割れを検査したが、割れは認められず



ビレットの外観



超音波探傷

4.2 二次溶解(鋳造)・押出試験(3)

【鋳造試験】②

- ピレットの化学組成確認：成分調整の結果、元の車両スクラップのアルミンゴッドと概ね同じ化学組成が得られ、JIS6005C（6N01）の組成範囲内であった。

化学組成表：鋳造の3ヶ所（鋳造始め、中、終わり）から採取、固体発光分析値の平均値を示す

比較対象：6N01-T5（過去の大型薄肉形材データより）

(mass %)

車両リサイクル 鋳造品	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn+Cr	Zr	Al	
	0.54	0.20	0.084	0.090	0.51	0.039	0.021	0.023	0.13	-	Bal.	
過去の 6N01- T5	A	0.50	0.13	0.09	0.04	0.69	0.04	0.02	0.01	0.08	-	Bal.
	B	0.67	0.21	0.10	0.11	0.60	0.04	0.01	0.02	0.15	-	Bal.
	C	0.55	0.22	0.09	0.07	0.73	0.04	0.02	0.02	0.11	-	Bal.
	D	0.69	0.17	0.14	0.16	0.64	0.07	0.01	0.03	0.23	0.10	Bal.
	E	0.81	0.17	0.18	0.34	0.53	0.02	0.01	0.02	0.36	-	Bal.
	F	0.77	0.20	0.01	0.18	0.47	Tr.	0.06	0.02	0.18	-	Bal.

JIS規格 6005C（6N01）

6005C 組成規格	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Mn+Cr	その他		Al
	0.4~ 0.9	≦0.3 5	≦0.3 5	≦0.5	0.4~ 0.8	≦0.3	≦0.2 5	≦0.1		≦0.50	個々	
										≦0.05	≦0.15	Bal.

参考文献：軽金属車両委員会6N01-T5疲れ試験分科会 大型薄肉形材用アルミニウム合金6N01-T5の疲れ強さ

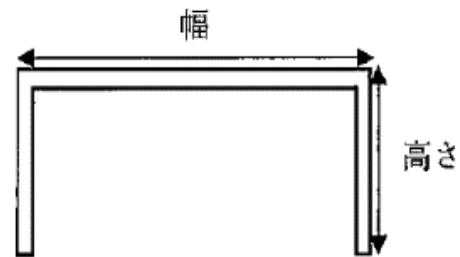
4.2 二次溶解(鋳造)・押出試験(4)

【押出試験】①

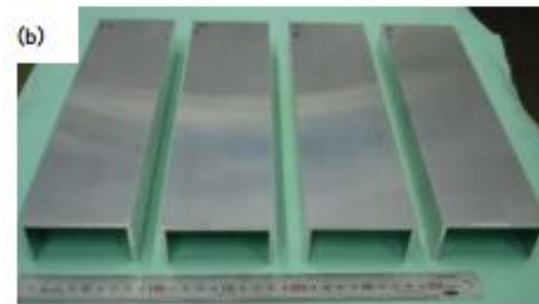
- ・ビレットを均熱化処理後、長さ750mmに切断し、押出機にて押出
- ・押出型材形状：チャンネル形 幅80mm×高さ40mm×肉厚4mm

押出後の表面観察
(外観観察項目)

異常なし
(ムシレ、フレ、気泡、ストリーク、
巻き込み、ピックアップ)



押出型材形状：
幅80mm×高さ40mm×肉厚4mm

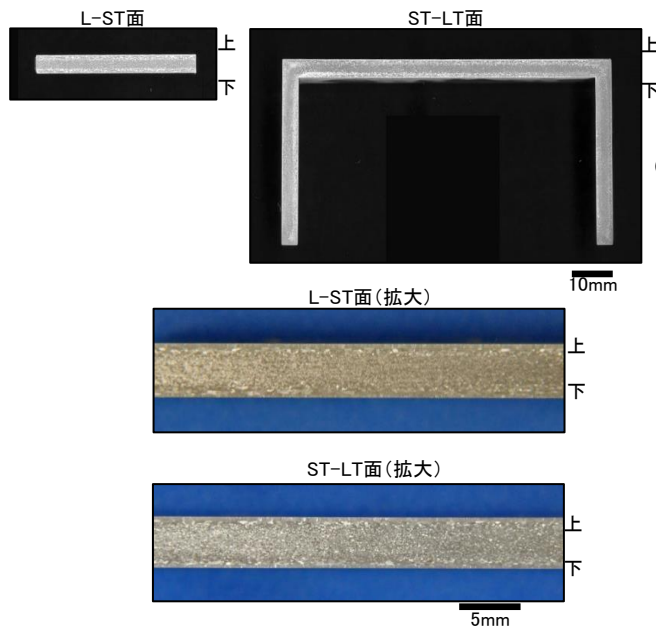


a)押出直後の外観 b)切断後の外観

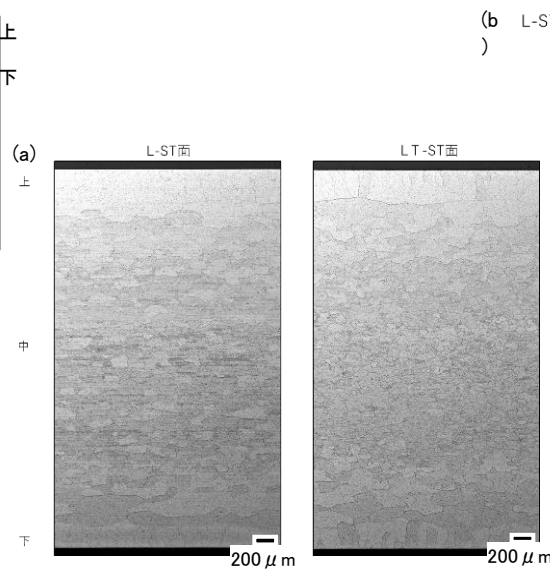
4.3 材料試験(1)

【押出試験】②-1

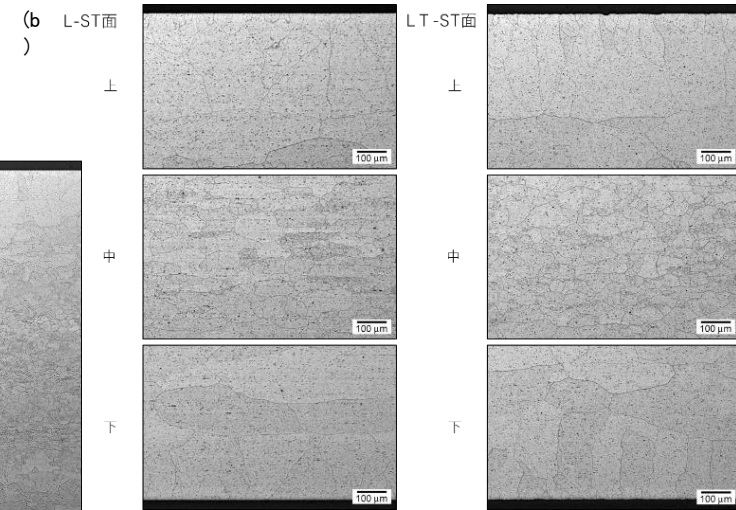
押出型材の組織観察：マクロ組織およびミクロ組織を観察し、過去の6 N01と比較を行い、異常のないことを確認した。



車両リサイクル6005C マクロ組織



車両リサイクル6005C ミクロ組織
結晶粒 (板厚全体)

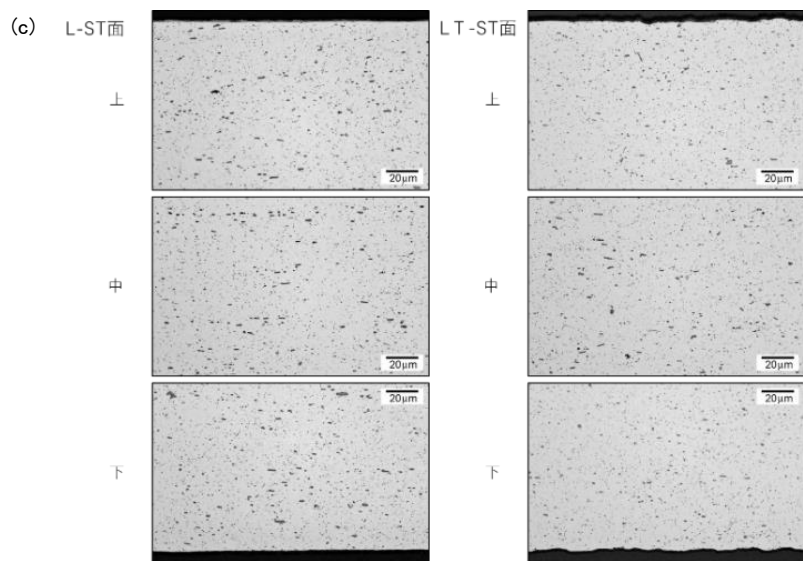


車両リサイクル6005C ミクロ組織
結晶粒 (拡大)

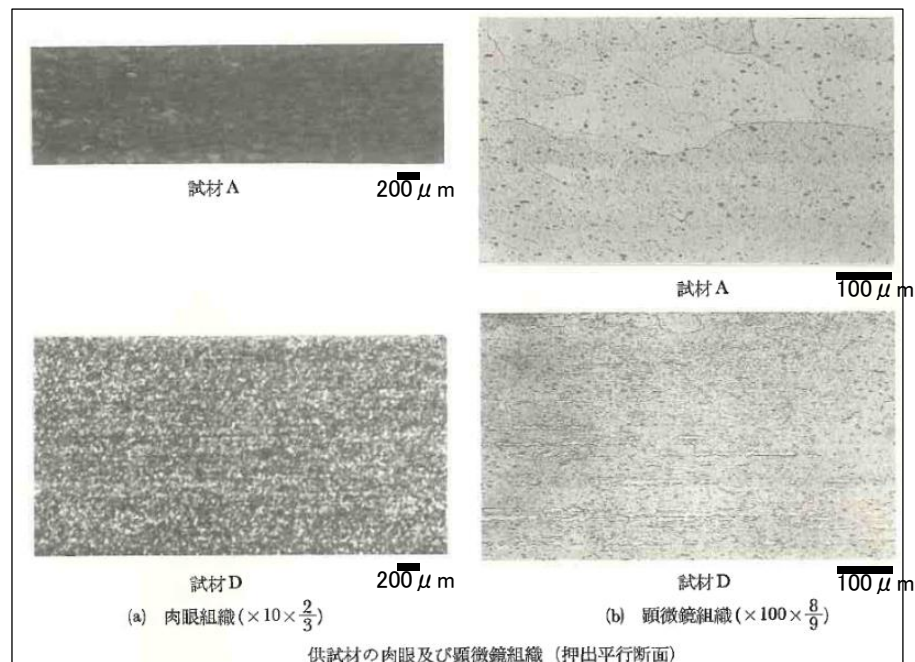
4.3 材料試験(2)

【押出試験】②-2

押出型材の組織観察：マイクロ組織の倍率500倍の観察では、化合物のサイズが約5 μm であり、異常は認められなかった。



車両リサイクル6005C ミクロ組織 500倍



(参考) 過去の6N01型材 (T5)の組織観察

4.3 材料試験(3)

【押出試験】③ <型材をT5処理後、材料試験>

・押出材の引張試験結果：引張強さ、0.2%耐力、伸びすべてで、**JIS H4100**の値を満足している。また、過去の6N01型材（T5処理）材と比べても同等である。

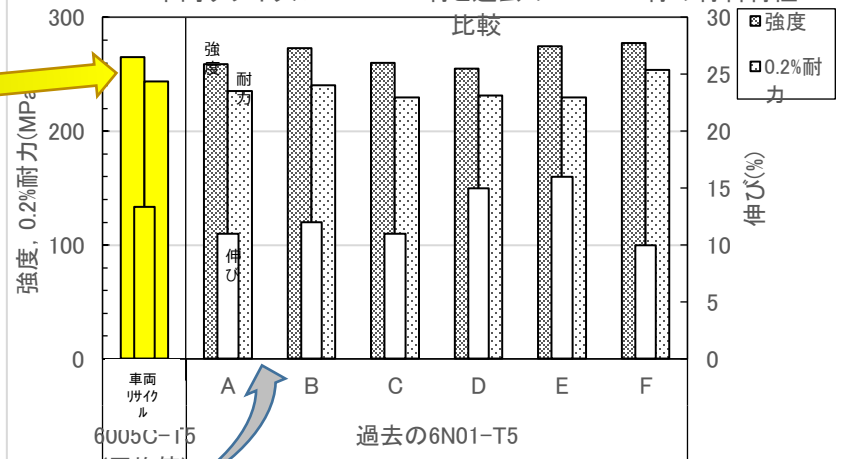
6005C（6N01）押出型材 **JIS H4100**

車両リサイクル試験品 引張試験結果

試料 No.	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	破断位置
3M-1	266.9	245.7	13.5	A
3M-2	265.4	243.6	13.7	A
3M-3	265.0	243.3	13.3	A
3M-4	265.3	243.8	13.3	A
3M-5	264.9	243.8	13.5	A
3M-6	264.5	243.1	13.7	A
3M-7	265.0	244.1	12.7	A
3M-8	265.4	244.6	13.3	A
3M-9	265.3	243.7	13.2	A
3M-10	265.6	244.6	13.5	A
平均値	265	244	13.4	
標準偏差	0.6	0.8	0.3	

質別	試験箇所厚さ(mm)	断面積 (cm ²)	引張強さ (MPa)		0.2%耐力 (MPa)		伸び, 最小, (%)	
			最小	最大	最小	最大	A _{50mm}	A
T5	6以下	-	245	-	205	-	8	-
	6を超え 12以下	-	225	-	175	-	8	-
T6	6以下	-	265	-	235	-	8	-

車両リサイクル6005C-T5材と過去の6N01-T5材の材料特性比較



過去の6N01-T5材 引張試験結果

試料 No.	板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸び (%)	形状
A	3	259.0	235.4	11	薄板型材
B	3	272.7	240.3	12	薄板型材
C	4	260.0	229.6	11	薄板型材
D	5	255.1	231.5	15	-
E	4	274.7	229.6	16	薄板型材
F	3	277.6	254.1	10	棒形材

4.3 材料試験(4)

【押出試験】④

疲労試験結果：

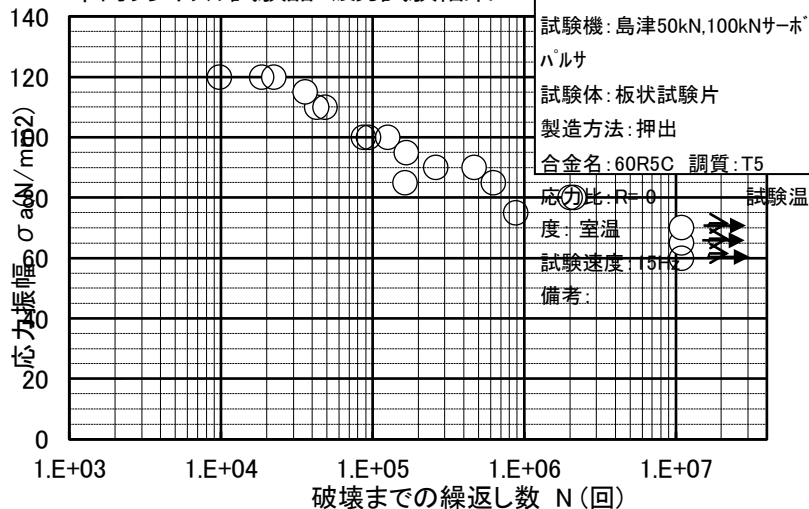
過去の6N01形材（T5処理）材と比べて同等である。

（右の表は、繰返し回数 10^5 、 10^6 、 10^7 で応力振幅を比較。ほぼ中間の値であることを確認した）

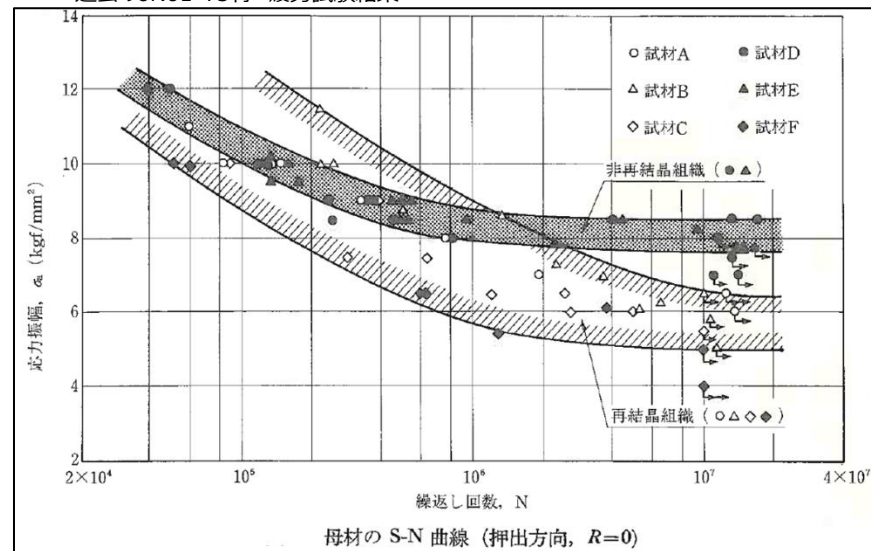
車両リサイクル試験品と過去の疲労試験結果比較

		応力振幅 (N/mm ²)		
		10 ⁵ 回	10 ⁶ 回	10 ⁷ 回
リサイクル6005C-T5形材		100	80	65*
過去の6N01-T5材 ⁽¹⁾	A	102	76	64*
	B	-	80	59*
	C	93	67	54*
	D	103	78	75*
	E	103	80	76*
	F	88	60	49*

車両リサイクル試験品 疲労試験結果



過去の6N01-T5材 疲労試験結果



4.4 まとめ

外観品質ならびに材料試験結果から、過去の6N01形材と同等であると言える

5. 規格の検討(プロセス認証、再生材アルミニウム合金)



委員会にて検討を重ね、第14回委員会（2019年2月）にて規格が承認され、2019年6月に規格書の発行を行った。以下に内容を示す。

5.1 規格名

日本アルミニウム協会規格 LIS AT6-2019

5.2 適用範囲

この規格は、アルミニウム合金製鉄道車両のアルミニウムスクラップを ※LIBSソーティングによって合金系別に固体選別した再生材アルミニウム合金と、そのLIBSソーティングのプロセスに適用する。

※Laser Induced Breakdown Spectroscopy、レーザー誘起ブレークダウン分光

5.3 要旨

「LIBSソーティング再生材アルミニウム合金」では、LIBSソーティングで合金系に選別された再生材アルミニウム合金として必要な項目と要件をまとめ、「LIBSソーティングプロセス認証」では、LIBSソーティングに関するプロセスの項目と要件をまとめた。

5.4 LIBSソーティングプロセス認証

項目	要件	備考
入荷	鉄道車両のスクラップを対象とし、以下を入手すること ①鉄道車両の履歴 （製造年、アスベストの有無など） ②廃車両を構成するアルミニウム合金名リストおよびアルミニウム以外の主たる部品リスト ③入荷までの解体履歴	
保管	他のスクラップと混合しないこと	
解体	入荷後の解体工程を提示すること	○別紙解体フロー参照 図1 重機解体選別処理フロー（例）
破碎	解体後の破碎工程を明確にすること	○別紙解体フロー参照 図2 一次破碎選別処理フロー（例） 図3 二次破碎選別処理フロー（例）
選別	選別工程を明確にすること （例：磁力選別、渦電流選別、重液選別・・・）	○別紙解体フロー参照 図4 LIBSソーティング処理フロー（例）
アルミ合金種選別	LIBSによるアルミニウム合金種区分選別について以下を提示すること ①合金種区分選別のアルゴリズム（成分とその範囲） ②LIBS識別の精度と校正結果 ③LIBS識別結果に従って正しく分離される装置であること ④装置の選別実績結果（選別品の合金種区分とその成分分析結果事例）	
梱包	①納入単位は約500～1000kgを目安とする ②梱包形態は、固体をバラで風袋に入れるか またはプレスした状態とする。	
在庫管理	①スクラップ入荷時の履歴が異なるものを区別すること ②工程履歴が把握可能であること ③水濡れ無きこと	
出荷	①水濡れしない輸送形態とすること ②出荷伝票への記載は以下とすること ・アルミ合金種区分 ・重量 ・スクラップ履歴（鉄道車両）	

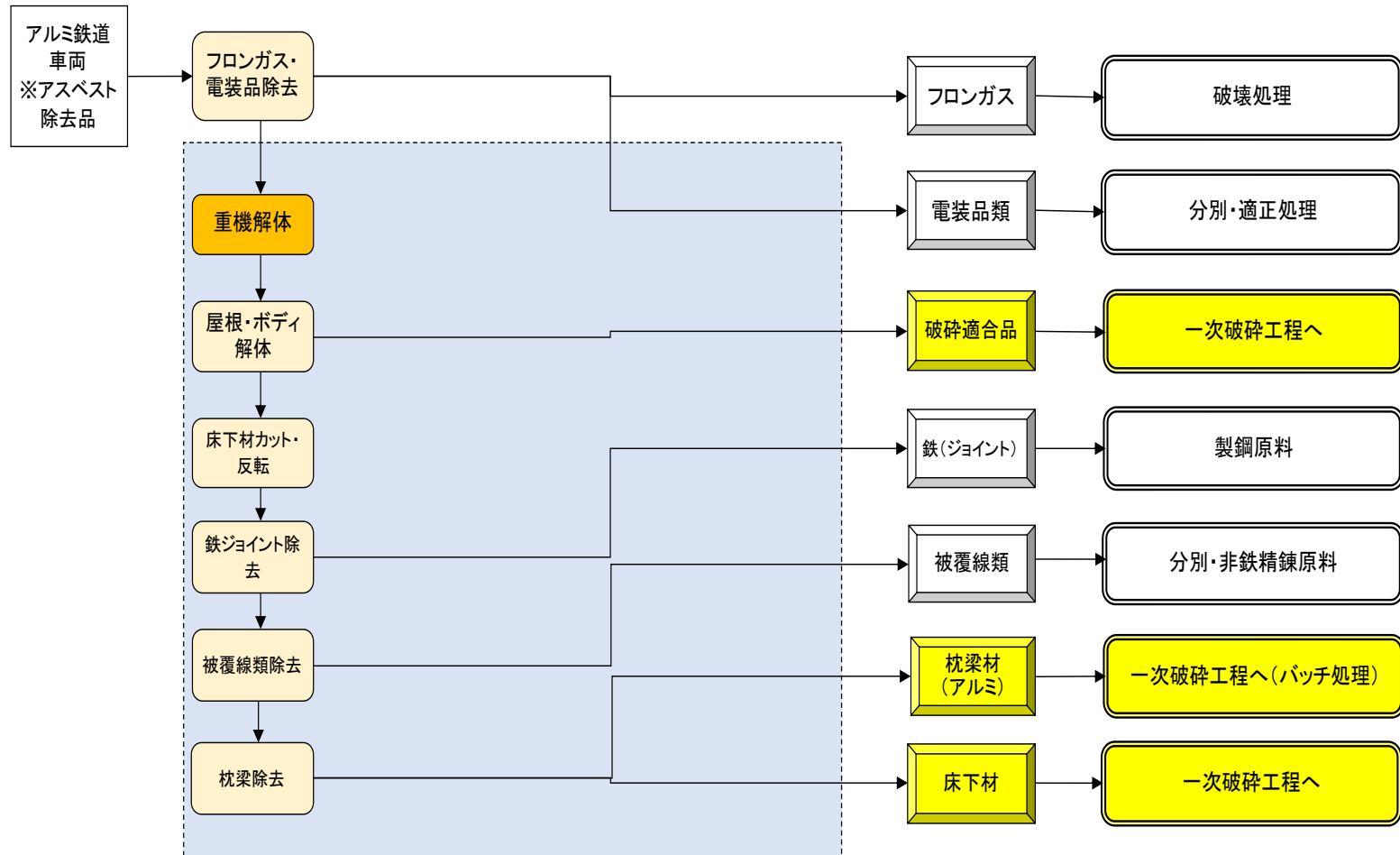
処理フロー（例）を
5.6項に示す

5.5 LIBSソーティング再生材アルミニウム合金

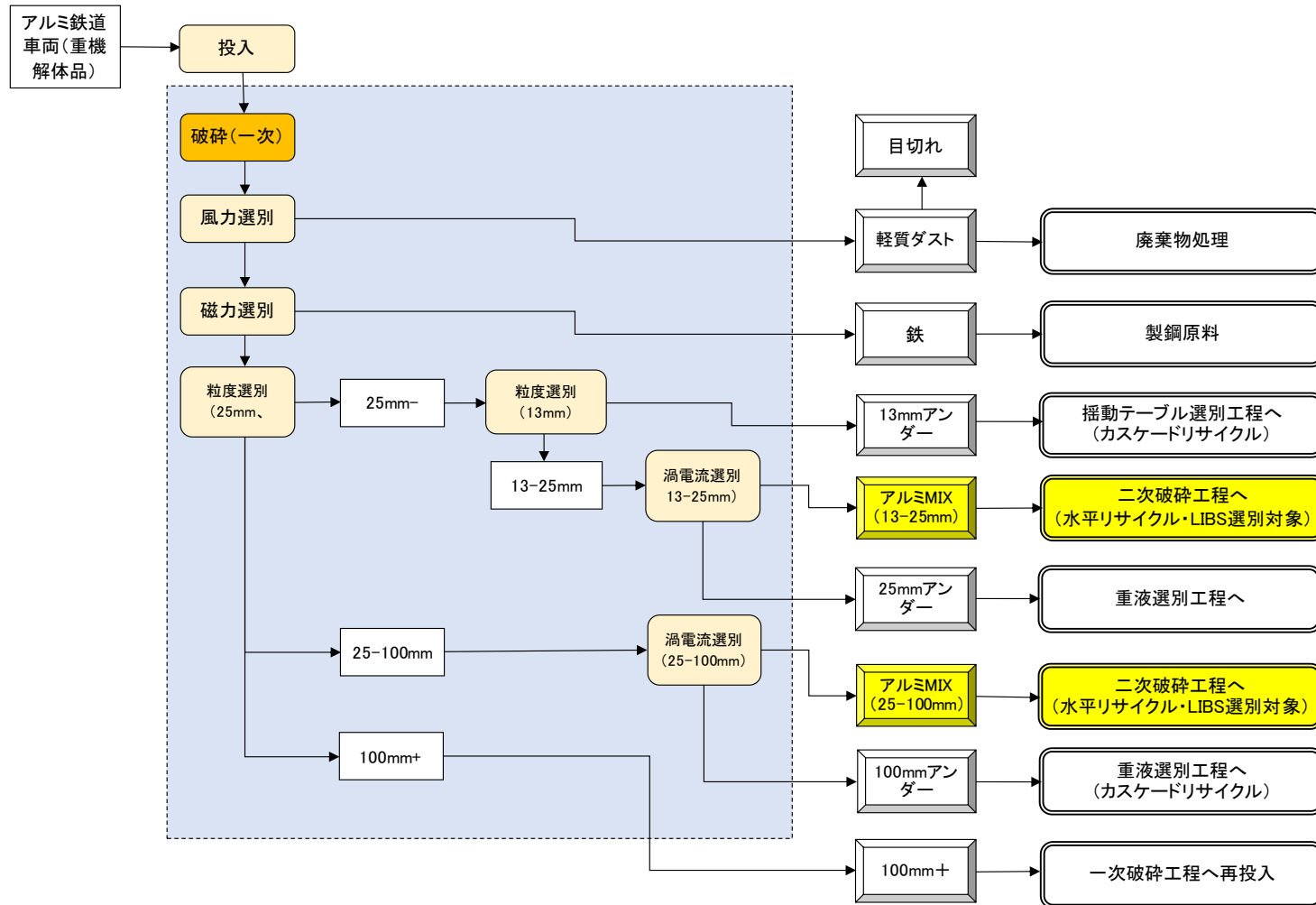
項目	要件
トレーサビリティ	<p>再生材履歴として以下を提示すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ①鉄道車両単体からの再生材であること ②廃車両を構成するアルミニウム合金名リストおよびアルミニウム以外の主たる部品リスト ③解体（前処理）工程と内容 ④プロセス認証を満足した選別品であること
成分	<p>化学組成の代替として以下を提示すること</p> <ul style="list-style-type: none"> ①プロセス認証を満足した合金種区分（1000系～7000系までの7区分） ②複数合金種区分が混合する場合は、それぞれの合金種区分の比率
異物	解体（前処理）とLIBS選別により、アルミニウム合金以外の異物なきこと
形状	形状やサイズは各社の基準を満たすこと
その他	<p>水分（前提：水濡れ無き事）</p> <p>風袋（フレコンバック、専用BOX【フォーク爪刺付き】etc）</p>

5.6 処理フロー

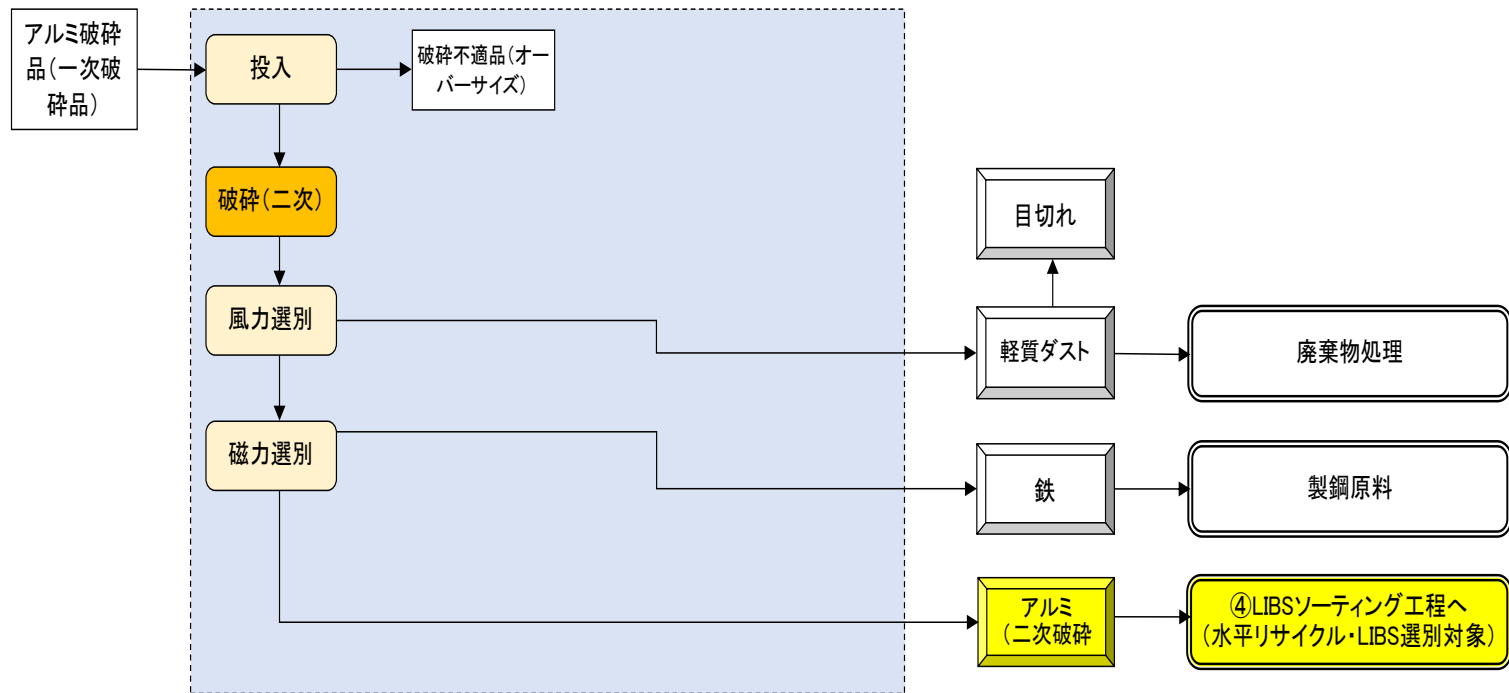
① 重機解体処理フロー(例)



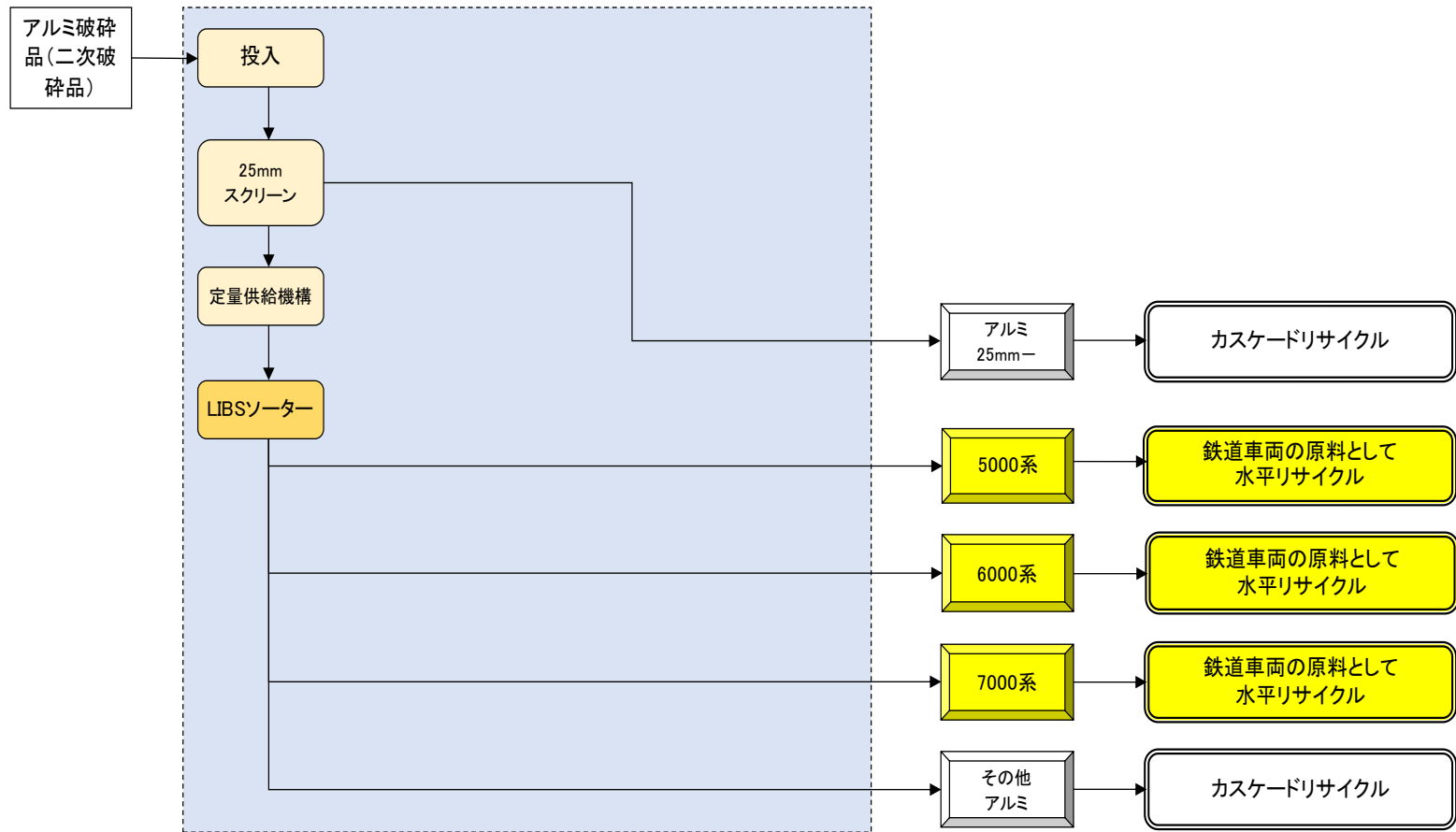
② 一次破碎選別処理フロー(例)



③ 二次破碎選別処理フロー(例)



④ LIBSソーティング処理フロー(例)



6. まとめ

- ・計14回開催された「アルミ車両の水平リサイクル推進委員会」において、LIBSソーティングプロセス認証および再生材アルミニウム合金の規格を承認し、日本アルミニウム協会規格として発行した（2019年6月）。
- ・アルミ車両のクローズドループの仕組みとなる規格の検討段階で、再生材を使用することの懸念を払拭するための議論に、多くの時間を費やすこととなった。
- ・そこで、溶解鑄造工程を実際に委員会で見学し、またLIBS選別された再生材アルミを約70%使用して溶解・鑄造・押出工程を経た製品の外観品質および材料試験結果が、通常品と同等であることが確認されたことにより、大きく前進することができた。
- ・今回は、製造プロセスを鉄道事業者、鉄道車両メーカー、リサイクル事業者、アルミ車両材メーカー各社のパートナーシップで課題を乗り越え、規格化できたことが大きな成果と言える。
- ・今後は、委員会参画企業を中心に本規格を基本として「アルミ車両の水平リサイクル」の実現に向けて、事業終了後も委員会の機能は残して継続議論していく。