

# 生分解性複合 プラスチックで プラごみから海を守れ

三宅 仁



Hitoshi MIYAKE  
アイコンポロジー(株)  
代表取締役。1980年広島大学大学院工業化学専攻博士課程前期修了。同年出光興産(株)入社。高分子複合材料開発の後、新規事業開発に従事。2014年石油化学工業協会出向。2016年アイコンポロジー設立。代表的な共著書：『微生物産生ポリエステル基礎と応用』(シーエムシー・リサーチ)ほか。趣味：街歩き、寺社探訪。退職後、次世代に何か残そうと一念発起しシニア起業。苦勞とともにやりがいもあり。連絡先：141-0022東京都品川区東五反田2-5-2-406(勤務先)/E-mail：email@i-compology.com

## 1 はじめに

2019年6月のG20大阪サミットで当時の安倍首相が高らかに「大阪ブルーオーシャンビジョン」を宣言し、日本が海洋プラスチックごみ(プラごみ)削減の主導的役割を果たすことを約束した。確かに世界では30位というものの、日本から周辺海域に流出するプラごみの量は2万~6万t/yrと推定されている。ちなみに2010年世界全体では780万t/yr、第1位は中国240万t/yr、第2位はインドネシア88万t/yrと文献<sup>1)</sup>から推計される。このまま増え続けると2050年には世界すべての魚の量を追い越すともいわれる<sup>2)</sup>。

さらにプラごみは紫外線や波力によって細かく砕かれ、マイクロプラスチックとなって有害物質を吸着し、食物連鎖で人への蓄積も懸念されていることから、海のプラごみ問題は気候変動問題と並ぶ「今そこにある危機」と捉えるべき問題である。

## 2 生分解性プラスチック

### 2.1 生分解性のメカニズム

生分解とは、細菌・菌類の微生物による低分子レベル、さらに二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)と水(H<sub>2</sub>O)にまで分解されることをいうが、ポリマーのような強固な長鎖分子においては、生分解を行える細菌種は極めて少ない。生分解性プラスチックといわれるポリマーは、ほぼすべてが

主鎖にエステル基をもつポリマーであるが、海水環境での生分解は限られた種類しか報告されていない<sup>3)</sup>。

生分解性プラスチックはマイクロプラスチックを残さないという大きな特長を有する。まずポリマー鎖はある種の細菌が出す酵素が触媒となって加水分解反応により細かく分断され、その後細菌は、細かくなった分子をエサとして食べることができるようになり、最終的にCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oに分解し排出され、マイクロプラスチックを発生させない。さらに植物由来ポリマーの場合は、このとき発生するCO<sub>2</sub>はカーボンニュートラルなので温暖化ガスにあたらない。

### 2.2 海水で生分解可能なポリマー

前節で述べた最も生分解が困難な海水で生分解する樹脂の代表的なものとして、ポリヒドロキシアルカノエート類(PHAs)がある。この種のポリマーの歴史は古く、1926年にフランスのLemoigneによってポリヒドロキシブタン酸(PHB)が発見された<sup>4)</sup>。その後1981年に英国のICIにより発明され特許出願された。その後いくつかの企業変遷を経て規模を縮小している。PHAsは化学合成ではなく、ある種類の細菌が植物油や糖類をエサにして自身の体内に樹脂をつくりため込んで生成するもので<sup>5),6)</sup>、これを集めて人間が利用するというまさに「養殖プラスチック」といえよう。

この種のポリマーは海水中で細菌による



生分解性をもち、日本の株式会社カネカが製造するポリヒドロキシブチレート-ヘキサノエートコポリマー (PHBH) は有名である。そのほかアメリカ、イタリア、中国、韓国でも PHAs を生産している。メイド・イン・ジャパンで第2、第3の PHA が待たれる。そのほか、化学合成のポリカプロラクトンも海水での生分解性を示すことが知られている<sup>7)</sup>。ほかにも開発中を含めいくつかのポリマーが報告されている。

いずれも石油由来汎用ポリマーと比べて少量生産のため価格は高いものの、生分解性に注目されれば使いやすい価格に収れんすることが期待できる。これまでのプラスチックはとかく機械強度・物性や価格が重視されたが、今後は環境性能や倫理性能が重要視される時代になってくるはずである。

### 3 海洋生分解性バイオマス複合プラスチック「Biofade™」

#### 3.1 原理と手法

アイ-コンポロジー株式会社は「成形性の優れた先進バイオマス複合材、i-WPC」を製造販売している。これは木粉を代表とするバイオマス粉55%を含むポリプロピレン (PP) 等の複合材で、射出成形をはじめ中空成形や真空成形も可能な複合材料である。弾性率はバイオマス濃度が増すほど上がり (55%でPPの3.9倍)、熱変形温度も48℃上昇するなどの特徴がある。

この技術を基に生分解性ポリマーを用いて応用したのが「Biofade (ビオフィェイド)」である。木粉等のバイオマス粉体自体は天然物であり、自然界の海洋で生分解されるものである。その価格は比較的安いいためバイオマス粉体の濃度が増すほどその原料コストが低減される。そして複合界面が増えることでの生分解性促進効果、さらに複合材自体の弾性率や熱変形温度等の機械物性の改善、なによりもカーボンニュートラル環境調和材料としての特徴をもつ。

日本には実に800万t/yrもの間伐材・未利用木材があるといわれるが、稲わらや麦わらなども未利用バイオマスとして活用できる。Biofadeは木粉やその他のバイオマスを使用するが、日本各地で未利用バイオマスを活用した町おこしも可能

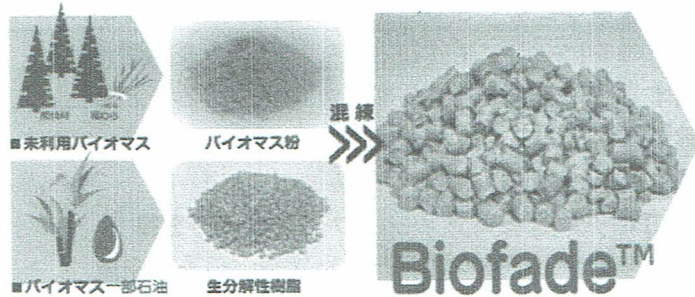


図1 バイオマス複合生分解性プラスチック「Biofade」

であり、持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals: SDGs) にも役立つだろう。

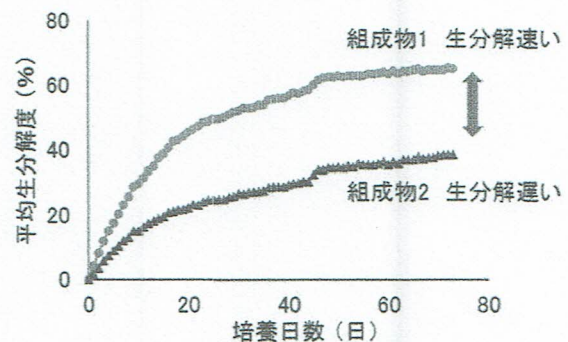
一方のポリマーは PHAs をはじめいくつかの生分解性ポリマーをブレンドすることで、成形法に適した物性変化が得られる。複合材にすることで原料ポリマーとフィラーを多種多様に変化させることができるのは大変奥の深いことであり、バイオマス複合プラスチックの可能性を広げられる(図1)。混合方法は従来の加熱式混練機が使用できる。

#### 3.2 生分解度と海水での実地試験

##### 3.2.1 生分解度

生分解度の試験は、酸素消費量に基づいて生分解度を求める方法があり、細かい粒子にした微量検体を密閉系で採取海水に漬けて数十日間測定する、いわば机上での加速試験である。

Biofade は、フィラーやポリマーの種類や濃度を変えることにより、生分解速度を変化させることができ、用途や成形法に適応した組成物の製造も可能である。図2に地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター (都産技研) で測定した2つの例を示すが、フィラーやポリマーの種類や組成により生分解速度だけでなく、材料物性も変



出所) 東京都立産業技術研究センターでの海水中生分解性評価

図2 Biofade の生分解度



化させることができる。生分解速度は速いだけでなく、用途によっては海洋で長期間使用するものもあり、生分解速度を遅くすることも重要なのである。

### 3.2.2 海水実地試験

NPO 気候危機対策ネットワークの協力を得て、実際の海での検証を行った。物性測定用の射出成形ダンベル等とともに約 0.2 mm 厚のプレス成形シートも同時に海に沈めた。横須賀深浦港と葉山沖に、サンプル個々を柔軟素材ネットで保護したものを網かごに入れて沈め、いくつかの貴重な結果が得られた。

代表的なサンプル写真を図 3 に示す。写真は横須賀深浦港の 21 日後と 97 日後のものであるが、0.2 mm 厚のシートにおいては、21 日後にダンベルと同様生分解の浸食による白化が見られ、97 日後においてはすでにバラバラに崩壊していた。ダンベル成型品では、21 日後には明らかに成型体表面が白色化しスキン層の樹脂が生分解により浸食されている様子が見える。さらに 97 日後では表面からやや深く浸食され表面の木粉が露出している。97 日後ダンベルでの曲げ試験では曲げ強さにおいて初期の 77 % 程度を保持していた。

成型品の場合は厚みがある分、生分解が進行しても内部まで完全に崩壊するにはまだ多くの日数がかかることがわかったが、2、3 年の耐久性が必要な用途によっては生分解が進みすぎることが逆に問題となる。

### 3.3 成形性

一般的に生分解性ポリマーは汎用ポリマーと比べて成形しにくいという固定観念がある。成形性は結晶化温度や結晶化速度が大きな因子といわ

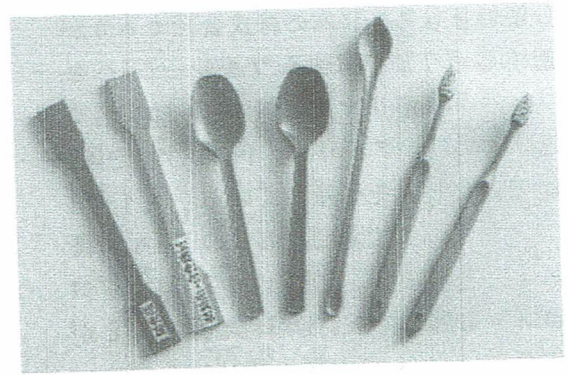


図 4 Biofade の射出成形例

れ、ポリ乳酸や PHBH、その他の樹脂においても成形性に難点があることが知られている。

得られた Biofade は、成形のしづらさがかなり改善できた。図 4 は成型品の一例であるが、いずれも容易かつ生産性よく射出成形が可能であった。射出成形技術者によれば、問題なく生産可能とのことであった。これは添加された木粉による結晶化促進効果があるかもしれない。

### 3.4 物性

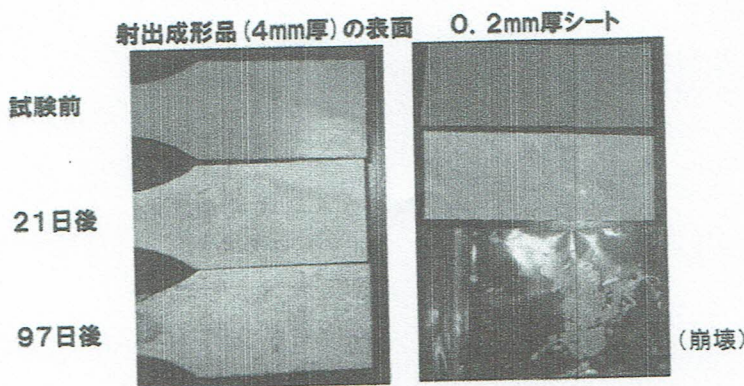
表 1 に一例として木粉 20 % 添加 Biofade の機械物性を示す。PP との比較を示したが、曲げ弾性率は 3.6 倍、曲げ強度も PP よりも高かった。衝撃強度は木粉複合の負の効果もあり低い値を示す。これをカバーするには厚みを増すのが手っ取り早いものの、補強ファイラー添加や補強デザインも考えられる。短期的な熱変形温度は PP よりも 25 °C 上回り短期間の耐熱性は PP よりもよい。

さらにファイラー種を置き換えたり、ポリマー種を変更あるいは組成比を変えることにより、さまざまな物性を得ることができる。さらに生分解の速さも調節ができることがわかった。また熔融域の物性変化により射出成形以外の成形も可能となり、成型品の生分解性の調節も可能となる。

## 4 Biofade の応用

### 4.1 実用開発テーマ

飲料ボトルやレジ袋等のプラスチックごみは、陸上で集めて再利用したほうが環境に負荷を与えない。沿岸に住む人には、PET ボトルやポリ袋ごみが目につくかもしれないが、現在のところ陸上での廃棄物管理を徹底するしかない



生分解により表面の樹脂が徐々に浸食されている。木粉は遅れて分解する

図 3 Biofade の海水中生分解試験 (横須賀深浦港)



表1 Biofade の物性表 (木粉系の一例)

試験項目	試験方法	単位	ポリプロピレン	Biofade (開発品)
比重	JIS K 7112	—	0.91	1.2~1.3
曲げ試験	弾性率 曲げ強度	JIS K 7171	MPa	1350
			MPa	41
シャルピー衝撃試験	JIS K 7111	kJ/m <sup>2</sup>	3.30	2.30
熱変形温度	JIS K 7191 (0.45 MPa)	℃	100	125
バイオマス度	—	%	0	> 87

注) 1. 本資料に記載されたデータは、特定条件下で得られた測定値の代表例であり、用途・製品の物性値を保証するものではない。

2. バイオマス度は成分比から算出した計算値であり実測値ではない。

だろう。

海のプラスチックごみで最も多いのは、漁網やロープ、浮き玉やフロート、沿岸の岩場のルアーや釣り糸である。太平洋の海鳥はPET ボトルのふたやライター、変わったものではカキ養殖用のパイプを飲み込み死んでしまう例が後を絶たない。

私たちはBiofadeを漁具や養殖具に活用できないかと考え、2020年度東京都ものづくりベンチャーBEAM事業で「浮き玉漁具プロジェクト」が採択された。これは漁具等のモデルを実際につくり、今後の用途開発の端緒となるものである。

## 4.2 漁具・養殖具等への応用

### 4.2.1 フロート、カキ養殖パイプ、ルアー、ブローボトル、その他

図5に試作品をまとめた写真を示す。

浮き玉フロートは、100%樹脂製であり流出したものは太平洋上をさまよう厄介者であり、数百年大海にさまよい島々に多く流れ着く。Biofadeを用い、射出成形により直径100mmの小さい浮き玉のモデルをつくった。さらに真空成形による簡易浮き玉や回転成形による直径500mm中空体も試作した。

カキ養殖では、ワイヤーに種付けしたホタテ貝殻を一定間隔に取り付け海に沈めるが、これに使うポリエチレン製スパーサーパイプが海に流出して海ごみ問題になっている。このパイプは陸地から1000km離れた小笠原諸島の中央部の父島の海岸にも多く漂着しているし、これを飲み込んだ海鳥が多く死んでいる。沿岸部では盛んになったルアーが岩場に引っかかっている。ルアーも射出成形で試作してみた。

また海岸に行くとやたらにPETボトルが目立

つことがある。そこでブロー成形により高さ12cm程度の小型ボトルを試作した。ブロー成形では射出成形とは大きく異なる溶融物性が要求されるが、材料組成により物性を調節できる特長が生かされた。

### 4.2.2 海水浸漬試験

図6に浮き玉モデルの海水浸漬試験60日後と400日後を示す。白いひも状の海洋生物が周りに繁茂するが、素表面はすでに生分解が起きて荒れて白く変色している。300日も経過すると強力に

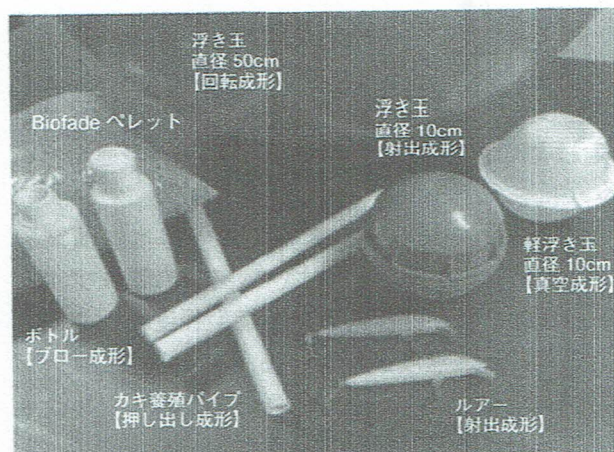


図5 漁具モデル等の試作

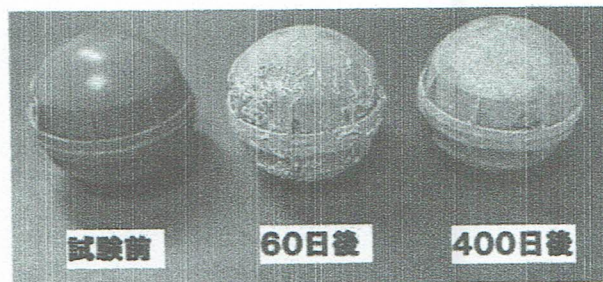


図6 浮き玉モデルと海水浸漬試験 (横須賀深浦港)



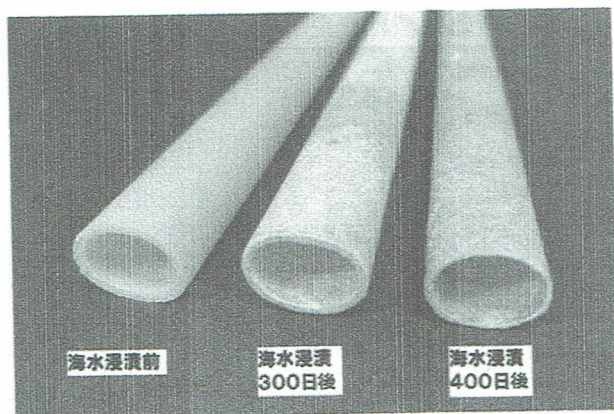


図7 Biofade 製カキ養殖パイプと海水浸漬試験 (横須賀)

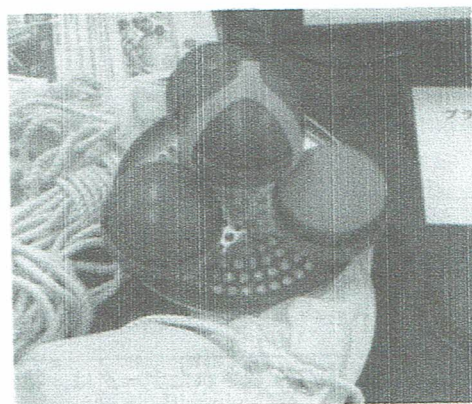


図9 GPS 内蔵の漂流調査ブイ



図8 直径 250mm リングフロート

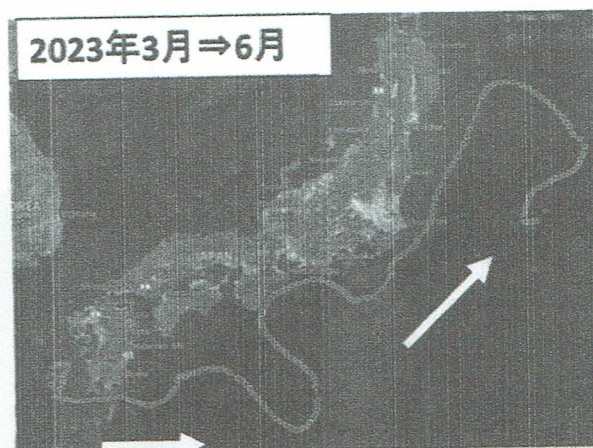


図10 くろしお大蛇行の漂流軌跡

付着していた海洋生物がこするとごそと取れるようになることから付着界面の生分解が進んでいる。

図7にカキ養殖パイプモデルの海水浸漬試験300日後と400日後を示す。確かに肉厚減少が観察できた。カキは収穫まで1年半程度かかるというが、生分解速度が速すぎると使い物にならず、実用に耐えるためには生分解が速すぎるため改良を加えている。

#### 4.2.3 大型フロートへの応用

浮き玉フロートの実用化を目指して、ブロー成形による大型フロートの検討を行った。

ブロー成形に適する溶融物性を追求し、図8に示す直径250mmリングフロートにトライし成功した。生分解性を持ち、ブロー成形したこの大きさの中空体は、おそらく世界的にも例を見ず、機会があればさらに大型フロートにも挑戦したい。

#### 4.2.4 学術調査用漂流ブイ

海流調査に用いるGPS内蔵の漂流調査ブイは、

いずれ海ごみになる運命であり、学術機関としても後ろめたい調査であった。株式会社ゼニライトブイでは、前述の生分解性小型浮き玉を組み合わせた図9の漂流調査ブイを組み上げた。2023年3月に東シナ海で放流されたブイは日本海・太平洋で軌跡を実測し、紀伊半島沖の「黒潮の大蛇行」の実測にも初めて成功した(図10)。さらにブルーカーボン向け資材への応用も検討中である。

### 5 おわりに

プラスチックが広く使われるようになって約60年、軽い、安い、形状自由といった特性によりプラスチックは今では世界中で4億t/yr生産され、多くは簡単に捨てられてしまう。

世界の海で780万t/yrがプラごみとなっているといわれるが、すべて人間が捨てた行為が原因である。今すでにあるプラごみをすぐに人為的に自然に戻すことはできないが、せめてこれからどうしても出てしまうプラスチックだけでもなんとかしたいと考え絞りだした材料が、海洋生分解性



バイオマス複合材料である。まだ課題は山積しているが、1つの例として漁具への適用を考え、成形に適した材料開発と成形試作を行った。

これからの日本の産業は、競争だけでなく協業が重要であり、アイデアを持ち寄って次の製品をつくっていくという体制が必要である。弊社はこの技術をオープンにして、海に囲まれた日本の企業で広く使っていただきたいと願っている。

#### 引用文献

1) Jambeck, J., etc., *Science*, 347, 768 (2015).

- 2) エレンマッカーサー財団, World Economic Forum (Industry Agenda), 14 (2016).
- 3) Iwata, T., et al., *Nature Communications*, 15, Article 568 (2024). <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44368-8> (2024.8.22)
- 4) 岩田忠久, *マテリアルライフ学会誌*, 32, (2), 27 (2020).
- 5) 日本化学会編, 持続可能社会を作るバイオプラスチック, 45 (2020).
- 6) 柘植丈治ほか, “生分解性プラスチックの環境配慮設計指針”, 71 (2019) シーエムシー出版.
- 7) (国研)産業技術総合研究所, 中山敦好ほか, 生分解性プラスチックの適正使用のための分解菌データベース作成に関する研究報告書 2014-16.

## エネルギー知ってるはず!?

**[Q]** 近年, 新しいエネルギー源として注目されている水素ですが, 実のところ製造時に  $\text{CO}_2$  を排出しないグリーン水素製造は発展段階です。現在確立されているのは, 化石燃料と水蒸気を反応させることで水素をつくる方法です。しかしながら, この方法では水素製造時に  $\text{CO}_2$  を排出してしまいます。このような方法で製造された水素はグレー水素と呼ばれています。

天然ガスを燃焼させて火力発電所でエネルギーを得る場合, 1 kWh の電力量を得るために排出される  $\text{CO}_2$  は約 480 g です<sup>1)</sup>。もし天然ガスからグレー水素を製造し, 燃料電池を使って発電した場合には, 1 kWh の電力量製造時に排出される  $\text{CO}_2$  はおよそ何 g でしょう?

- ① 180 g    ② 280 g    ③ 380 g    ④ 480 g

**[A]** 天然ガスから水素 1 kg を製造したときの  $\text{CO}_2$  排出量は, 9 kg とされています<sup>2)</sup>。水素が酸素と反応して水になるときに得られるエネルギーは, 水素 1 kg 当たり約 39 kWh なので, 天然ガスから 1 kWh 分の水素を製造するときの  $\text{CO}_2$  排出量は約 230 g- $\text{CO}_2$ /kWh となります。加えて, 現段階の技術では燃料電池の効率は高く 60 % であるため<sup>3)</sup>, 得られる電力量当たりになると, 約 380 g- $\text{CO}_2$ /kWh となります。このように, グレー水素の利用だけでは  $\text{CO}_2$  排出量の削減にはあまり貢献できません。そのため, 化石燃料から水素を製造したときに出てくる  $\text{CO}_2$  を回収して貯蔵や利活用するブルー水素, クリーンエネルギー (太陽光や風力発電による電気エネルギー) をエネルギー源としてつくられたグリーン水素の利用が重要となります。[正解は③]

出所) 1) 資源エネルギー庁, 火力発電の効率化.

[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/018/pdf/018\\_011.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/018/pdf/018_011.pdf)

2) IEA, Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/acc7a642-e42b-4972-8893-2f03bf0bfa03/Towardshydrogendefinitionsbasedontheiremissionsintensity.pdf>

3) 電力中央研究所, 電中研レビュー No 51 燃料電池発電技術 - MCFC 実用化への挑戦 -, 第一章.

<https://criepi.denken.or.jp/koho/review/No51/chap-1.pdf>